

マルチメディアによる
船体構造損傷データベースの構築
(研究課題番号08305037)

平成8年度～平成10年度
科学研究費補助金(基盤研究(A)(1))
研究成果報告書

横浜国立大学附属図書館



10734024

平成11年3月

研究代表者 角 洋一
(横浜国立大学工学部教授)

横浜国立大学附属図書館



10734024

はしがき

世界的な船舶の急激な高齢化や最近の相次ぐバルクキャリアの全損事故等を背景として、経年船の構造健全性の維持が緊急の課題としてクローズアップされている。経年船の構造健全性の維持のためには、定期検査による腐食衰耗、疲労き裂、座屈や凹損の発見と的確な修理が必要である。しかしながら現状では、検査等で発見された損傷データの統一的な記述方法やそれに基づく評価方法が確立していないために、適切な評価対処が行われないことも多い。また、造船設計者、船主、監督機関等の各機関の間の損傷情報の伝達が不十分であるため、それらの損傷情報が有効に活用されていないという問題点が指摘されている。本研究ではこれらの問題点の解決のためにマルチメディアを用いた船体構造損傷データベースに関する研究を行い、以下の知見を得た。

1. マルチメディアを利用した船体構造損傷情報データベースの構築

本研究では、設計者・修繕者・船主・監督機関など異なる立場の構造損傷に関する情報の共有化と共通理解を形成するための手段として、まず第一にマルチメディア技術の利用に関する研究を行った。具体的には、各種損傷情報を体系的に整理するとともに、研究者らが研究開発を行った材料力学教育システムの技術を用いたデータベース（事例ベース）の構築を行った。マルチメディア技術としては、損傷の3次元CG（Computer Graphics）による表示や船体構造内のウォークスルー、画像等による表示を用い、それによりマルチメディアの特徴を生かしたインタラクティブで視覚的に理解しやすいデータベースを構築することができた。また、本システムは、「船体構造力学」のための教育システムとリンクすることにより、損傷原因の理論的背景等も把握しやすいシステムとすることができた。

2. 船体損傷情報システムの構築

近年、造船CIM（Computer Integrated Manufacturing）の研究とその実用化が進められ、プロダクトモデルを中心とした情報化による設計生産の効率化が実現しつつある。また最近では、船体の設計生産だけではなく、運用中の船舶の保守管理を含めた、ライフサイクルサポートの考え方が提唱されるようになってきている。このような背景から、本研究では、現状におけるコンピュータ支援技術及びマルチメディア技術を用いて、船体の保守管理を支援する船体損傷情報システムに関する研究を行った。このようなシステムの実現のためには、まず第一に、設計者、修繕技術者、船主、監督機関など異なる立場の海事関係者が損傷情報に関する情報を共有するためのプラットフォームを持つことが重要である。そこで本研究では損傷情報を統一的に記述するためのオブジェクト指向に基づいた損傷モデルの提案を行うとともに、データベースを中心とした保守管理支援するシステムの提案を行った。また、具体的な例として、シングルハルトタンカーを対象とした試作システムをInternet環境下で構築することにより、提案したシステムの有効性を示した。

3. 船体損傷情報システム構築のための解析技術に関する検討

船体損傷情報システムにより損傷情報が得られた場合、それらを有効に活用するためには損傷情報を的確に評価する解析手法の確立が重要となってくる。そこで本研究では、き裂等の特異性を有する2次元弾性問題に対する誤差評価手法、防撓構造の最終強度解析手法、き裂進展解析手法等に関しての検討を行った。

研究組織

研究代表者：角 洋一（横浜国立大学工学部教授）
研究分担者：伏見 彬（東京大学大学院工学系研究科教授）
研究分担者：北村 充（広島大学工学部助教授）
研究分担者：川村 恭己（横浜国立大学大学院工学研究科助教授）
研究分担者：正岡 孝治（大阪府立大学工学部講師）

研究経費

| | |
|--------|----------|
| 平成8年度 | 5, 600千円 |
| 平成9年度 | 1, 600千円 |
| 平成10年度 | 2, 400千円 |
| 計 | 9, 600千円 |

研究発表

(1) 学会誌等

1. 川村恭己、廣田一博、山田英城、角洋一、マルチメディアの特性と教育への効果的利用法に関する考察（マルチメディア材料力学教育システムの構築を通じて）、日本機械学会論文集（A編）、第62巻603号（1996-11）、pp.2489-2494.
2. 川村恭己、角洋一、廣田一博、山田英城、本間芳雄、鈴木健大、マルチメディアによる船体構造教育システム（解説）TECHNO MARINE 日本造船学会誌第817号、平成9年7月号、pp.527-533.
3. 川村恭己、角洋一、廣田一博、山田英城、材料力学教育へのマルチメディアの利用、機械の研究、第49巻、第10号（1997）、pp.1011-1018.
4. 川村恭己、角洋一、関智哉、船体損傷情報システムに関する研究、日本造船学会論文集、第184号、平成10年（1998）、pp.527-536.
5. 北村充、信川寿、岡本直樹、特異性を考慮した2次元弾性問題のアダプティブリメッシング、日本機械学会論文集、A編-第619号-第64巻、1998、pp.661-665.
6. 正岡・吉岡・岡田・上田、複合荷重をうける連続矩形パネルの崩壊挙動の解析法、関西造船協会誌、第229号、1998、pp.137-143.

(2) 口頭発表

1. 川村恭己、角洋一、関智哉、船体損傷情報システム構築の試み（き裂・腐食損傷のモデル化と試作システムの構築）、第48回応用力学連合講演会、講演予稿集、1999、pp.49-50.
2. Y. Kawamura, Y. Sumi, Development of the automatic mesh generator based on the paving method for the automatic crack propagation analysis, Modeling and Simulation Based Engineering (Proceedings of the International Conference on Computational Engineering Science), Tech Science Press, Vol.2, 1998, pp.1287-1292.
3. 角洋一、経年船の構造安全性、第1回海事工学シンポジウム「海の安全と環境」、1998年12月、pp.51-89.

(3) 出版物

1. 川村恭己、廣田一博、山田英城、角洋一、マルチメディア材料力学、アドウィン&日経BP社、1998年4月

1. マルチメディア技術の利用について

マルチメディアの特性と教育への効果的利用法に関する考察

マルチメディアの特性と教育への効果的利用法に関する考察* (マルチメディア材料力学教育システムの構築を通じて)

川村 恭己*¹, 廣田 一博*²
山田 英城*², 角 洋一*¹

On a Computer-Aided Instruction System Using Multimedia (A CAI System-Development for Strength of Materials)

Yasumi KAWAMURA, Kazuhiro HIROTA,
Hideki YAMADA and Yoichi SUMI

It is a serious problem that many students neither show any interest in traditional-style lectures, nor do they read traditional-style textbooks. One of the reasons for this is that the traditional teaching method does not fit the younger generation of the TV-era. As a result, university students may fail to understand the fundamental concepts of engineering sciences which are essential in solving real engineering problems. In order to overcome this problem, we have developed a CAI system based upon recent developments in computer hardware and software enabling use of multimedia data, which include text data, graphical data, and sound data. The present system makes use of interactive digital movies, and it runs on inexpensive personal computer systems so that university students can use it personally and learn the engineering fundamentals intuitively. In the present study, the system is applied to a course in strength of materials including interactive movies on material experiments such as a Charpy test and tensile tests, where it demonstrates the effectiveness and advantages of a multimedia instruction system.

Key Words: CAI System, Multimedia, Interactive Digital Movies, Engineering Education, Strength of Materials

1. 緒 言

専門的な教育分野において、さほど難解でない事柄でもすぐには直観的理解を得られなかったり、授業に興味を持つきっかけをつかめなかった経験は誰にもあることと思う。また、最近では、高校までの受け身教育の弊害から、学生がなかなか授業に興味を示さないという問題もある。

ところで、近年のコンピュータの計算速度の飛躍的な向上やデータ記憶装置の大容量・高速化は、従来困難であった文字/静止画/動画/音声などの処理を比較的安価なパーソナルコンピュータレベルで可能にしつつある。これに伴い、コンピュータ上で前述のメディアを融合させたマルチメディアが大きな注目を浴びている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。教育分野においても、利用者と比較的高度なコミュニケーションのできるマルチメディアは、テレビやVTRとは一線を画する存在である。

このような背景から、マルチメディアを授業や教材に活かすことができれば、より効果的な教育が行える

のではないかと考え、マルチメディアを用いた材料力学教育システムの研究開発を行った。最近のマルチメディアの教育への利用動向や試作システムの利用については、すでに辻ら⁽⁴⁾が述べているが、本論文では、マルチメディアの特性とその教育に対する効果をより具体的に視覚効果、擬似体験効果、インタラクティブ効果の三つに分類整理し、それらの特性が材料力学教育のどの場面で最も効果を発揮するかを考察し、システム開発に反映させた。具体的には、材料力学の教科書の範囲をカバーし、学生実験のガイダンスに用いることができる、インタラクティブなデジタルムービーを制作した。

本論文では、まず、著者らの開発したシステムを前述の特性別に紹介し、さらに、本システムを実際の教育現場において利用した結果をもとに、マルチメディア教育システムの有効性について述べる。

2. マルチメディアと開発環境

2.1 マルチメディアの特徴 マルチメディアとは、複数のデジタルメディアをコンピュータで統合し、一元的に扱うことを指す。以下に、マルチメディアの特徴を述べる(図1)。

(1) デジタル化 デジタル信号化によるメ

*1 正員, 横浜国立大学工学部 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)。

*2 横浜国立大学大学院。

ディアの一元管理が、マルチメディアの根幹である。さまざまな種類のメディア形式をデジタル化することで、コンピュータ上でそれらを自由に組み合わせて処理することが可能になるという特徴がある。

(2) インタラクティブ性の獲得 一般にインタラクティブとは、『人間と情報端末間に情報のやり取りがあり、利用者が主体的に自分の欲しい情報を得られること』を指すとされている⁽⁵⁾。マルチメディアの登場により、インタラクティブ性を備えていなかった文字/静止画/動画/音声などの表現メディアがコンピュータにのことで、新たにインタラクティブ性を獲得した。インタラクティブの代表的な例として、ハイパーテキストの考え方が⁽⁴⁾。

(3) ネットワーク化 マルチメディアのデータ量は膨大であり、おもにCD-ROMがその媒体として用いられている。しかし、ネットワーク化によるマルチメディア情報の共有が実現されれば、膨大なデータを個人ごとに所有するという非効率を排除できる。ネットワーク化の主演としてInternetが目されている。リアルタイム性、データのフィードバック、メンテナンス等、多くの点から、マルチメディアにおけるネットワークの利用は不可欠となるであろう。

(4) シームレス化 シームレスとは、さまざまな境目がなくなり融合して行くことである。現在情報メディアにおける各種メディアの統合により、様々な業種、商品の区別がつきにくくなっている。放送、出版、通信の分野ではそれが顕著である。この現象は教育分野にも順次進んでいくと思われる。また、先に挙げたネットワーク化が進めば距離の境目も消えていくことになる。

2.2 マルチメディアの開発環境 現状で利用できる開発環境を以下に挙げる。

(1) パーソナルコンピュータ上でオーサリングソ

フトを用いる オーサリングソフトウェアは文字/静止画/動画/音声などの情報を同時に取り扱うことが可能であり、アニメーションによるグラフィックス処理も行うことができる。また、高度なユーザとのインタラクティブ性を実現できるという特徴がある。

(2) マルチメディアとInternet 1994年頃より爆発的に発展したInternet上の情報サービスWWW(World Wide Web)を用いたマルチメディアシステムの最大の利点は、ネットワークに接続したコンピュータ上にマルチメディアデータベースがあれば、世界中のどこからでもそのシステムにアクセス可能であり、情報の共有ができるという点である。

現在、前述のオーサリングソフトを用いた場合に比べインタラクティブ性に乏しく、国内のネットワークのインフラの問題をかかえている。しかし、将来的にはマルチメディア利用の主流となるとと思われる。

(3) Virtual Reality (VR)⁽⁶⁾ VRはリアルタイムで取り扱える立体視可能な三次元コンピュータグラフィクスに、(物をつかむ、ドアを開けるなどの)インタラクティブ性を加えたシステムである。しかしながら、このシステムは大変高価であり実用的とはいえない。

2.3 本システムで用いた開発環境 以上のような選択肢から、本システムでは手軽さと卓越したインタラクティブ性の付加能力から、最初に挙げたオーサリングソフトウェアを用いる環境を選択した。具体的にはPowerMacintosh 8100/80 AV上でDirectorというオーサリングソフトウェアを用い、各種デジタル素材を統合した⁽⁷⁾⁽⁸⁾。Directorで作成したムービーは、Shockwaveを用いることで、すぐに、2.2節で述べたWWWにも対応させることが可能である。各々の素材の制作にはそれぞれの専門のソフトウェアを用いた(図2)。

3. 材料力学教育における マルチメディアの有効性

3章では、実際に著者らが制作した教育システムを紹介しながらマルチメディアを用いる有効性を考察する。なお、本システムは前述のように材料力学の基礎的な項目をひとつおきカバーする形で制作されており、教科書でいう章という単位をムービーという言葉で表現している。また、この教育システムの使用方法として、授業で必要な部分を学生に見せる、あるいは学生がパーソナルコンピュータの前で自分で操作しながら自習する、という二つの状況を主に想定しながら制作した。

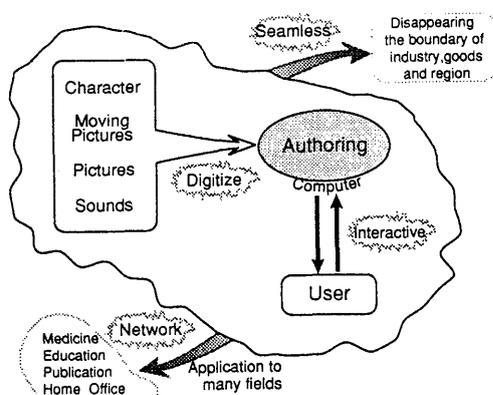


Fig. 1 The outline of multimedia

3.1 直接視覚に訴える効果

(1) 物体の変形の可視化 コンピュータグラフィックスによるイメージアニメーションを各ムービーの初めに多く取り入れている(図3)。このようなアニメーションを初めに見せることで学習意欲をそそり、その現象に対する具体的なイメージをもってもらおうことがねらいである。材料力学では例えば、棒の引張りに対するひずみ現象や、はりのたわみ現象、柱の座屈現象などを理論として扱う。これらの理論に取り組む前に実際にはその現象がどのような変形をするのかをイメージしたほうが、イメージしないまま理論に取り組むよりも、理解をするきっかけをつかみやすいのは明らかである。

(2) 式変形のアニメーション化 式変形をアニメーション化するという手法を取り入れている(図4)。演習問題を解いたり理論の証明を自分で試みたりした場合、どの式をどの式に代入すると解を得られる

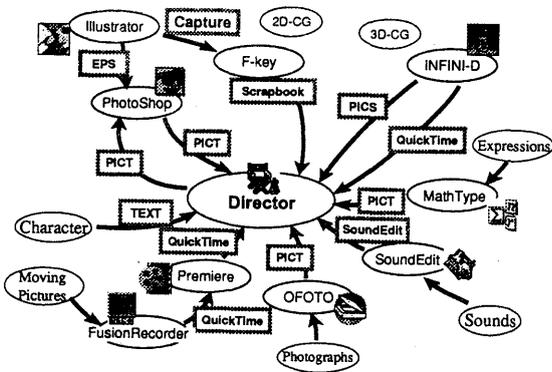


Fig. 2 Authoring multimedia data by applications

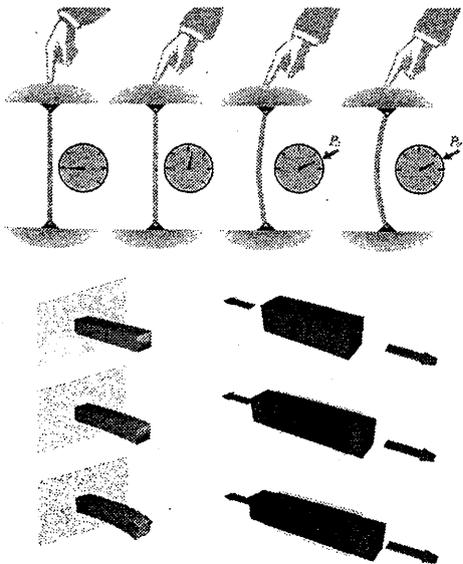


Fig. 3 Visualization of the deformation by 3D animation

のか、あるいはどこでどのような知識を活用するのか、という疑問で頭を抱えた経験は誰も一度はあることだろう。そこで少しでもこの悩みを解消させるために式変形をアニメーション化するという工夫を試みた。授業中の教師の板書と説明には及ばないが、自習をする際には大変役に立つものであろう。

3.2 擬似体験の効果 本システムでは、引張試験やシャルピー衝撃試験を題材に擬似体験を行えるムービーの制作を行った。教科書のように延性-脆性遷移に関連させて目的や結果を解説すると同時に実験風景を映し出せるようにした(図5)。このムービーを見ることによって、実際には実験をやらなくてもそれに

(証明)

断面の圆心を通る軸の、任意の点Aにおける曲げモーメントをまず考えてみよう。

$$M = Py$$

これをたわみの微分方程式 $\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI}$ に代入する。

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{Py}{EI} \therefore \frac{d^2y}{dx^2} + \frac{P}{EI}y = 0$$

ここで計算を簡便にするために $\frac{P}{EI} = K^2$ とおくと

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{Py}{EI} = 0$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} + K^2y = 0$$

Fig. 4 Image animation for equation manipulation

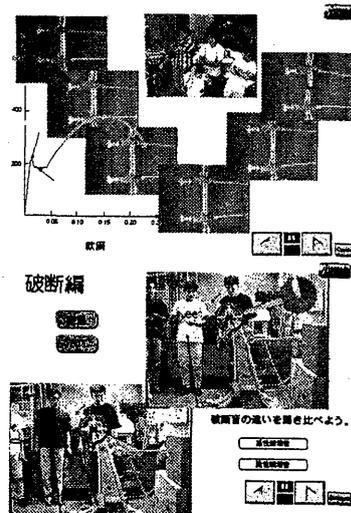


Fig. 5 Virtual experiment

近い体験をしたように感じることができる。実際に試験をしてみると、専用の試験機はもちろんのこと、かなりの労力と時間が必要になるため、擬似体験のできるシステムは重宝され得るだろう。

3.3 インタラクティブの効果 次にインタラクティブの一例を示す。

(1) ボタンに反応する絵 例えどどこが“中立軸”あるいは“中立面”なのかという疑問に対して、それらの専門用語のボタンを画面上でクリックすると三次元的に表した絵の中でそれらに対応する部分が点灯するような機能を取り入れた(図6)。教科書などを読みながらでは頭の中にイメージを創るにはかなりの集中力が必要になってしまうが、この機能を用いれば容易にどの部分が中立軸あるいは中立面なのかを目で見て理解できるようになる。

(2) 個人のペースの尊重 テレビ放送やVTRと違い、始めから終わりまでじっと見ている必要はない。わかるところは読み飛ばし、わからないところや、興味のあるところを納得ゆくまで何度でも見直すことができる。すなわちマルチメディアを用いることにより、情報の選択をユーザが自由に行うことができるのである。

例えば、先に挙げたシャルピー衝撃試験において、延性破断音と脆性破断音を自由に何度も聞き比べたい、という要求に実験で応えることは難しい。しかしインタラクティブの特徴を用いればこのような要求にも簡単に応じることができる。

4. 教室におけるマルチメディアシステムの利用効果と問題点

4.1 本システムの利用形態と教える側の有効性

本システムは講義用および学生自習用として制作されたが、現時点では学生全員が所持するノート形パーソ

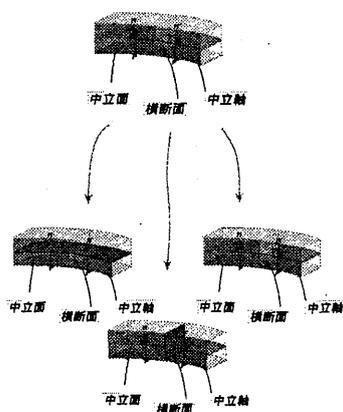


Fig. 6 Instruction with interactive buttons

ナルコンピュータには対応していないので、今回は材料力学の講義の一部に実際に使用し、その有効性と問題点を検討した。利用法としては、

(1) 授業開始時の導入部分で、前回講義の要点を本システムにより説明し、学生の記憶を呼び起こす、

(2) 授業そのものは黒板を用いた伝統的板書形式で行い、学生がノートをとることができるようなペースで話をするが、内力の概念、変形、破壊などについては、本システムのビジュアルな映像を板書に替えて随時使用する、

(3) 授業の最後に、本システムによって簡明な講義のサマリーを行う、などである。

教室には2台の29インチ・ビデオモニタがあるので、ビデオ出力のあるパーソナルコンピュータ本体を持ち込み、モニタに直結してパーソナルコンピュータのモニタ画面を出力することができた。大画面の液晶プロジェクタなどがあれば、さらに教育環境は向上するであろう。

教える側の立場からは、(1)で要領よく自然に本題に入ることができる。また(2)では、複雑な図を板書する時間が節約でき、また破壊現象などは映像を随時、また必要に応じて繰り返し見せることができるという利点がある。従来のビデオ映像でこのようなことを行おうとすると、頭出しに時間をとられ実際のでないが、マルチメディアのインタラクティブ性による操作性の良さを実感できる点である。(3)における本システムの利用法は、基本的には(1)におけるものと同様であるが、変形などの物理現象に加え、応力の定義、式の変形など複雑な説明を要領良くサマリーできることが挙げられる。教える側として本システムを講義に用いることによる不都合は特に無かった。

4.2 学生の反応 一方、学生の反応を調査するためアンケートを行った。アンケートの対象とした学生は材料力学I・演習の講義受講者(34人)である。以下にアンケート結果を示す。

物体の変形の可視化に関し、全体の97%の学生が大変理解しやすい、または、ある程度理解できたと答えている[表1(Q1)]。実験の擬似体験についての質問に対しては、全体の91%の人が理解できると回答している[表1(Q2)]。本システムのインタラクティブな機能については、全体の91%の学生から理解しやすいとの回答を得た[表1(Q3)]。講義のまとめに本システムを利用することに対しての質問では、全体の94%の学生より、「ある程度理解できた」、または、「大変理解しやすい」という回答を得られた[表1(Q4)]。続

いてマルチメディア教育システムの利点を問う質問では、「画像(三次元CG)・アニメーション・映像を用いることにより教科書や黒板では記述しにくかった現象が理解できる」「マルチメディアにより講義に興味をもつことができる」など、本システム導入の目的にかなった回答が多く出た [表1(Q5)]. マルチメディア教育システムの問題点については、表1(Q6)のような意見が寄せられた。最も多かったのは、「TV画面が小さくて文字が見づらい」という意見であった。これは、本システムを講義で使用する場合のTV画面が29インチと講義用には小さく、良く見えなかった学生が多かったためである。他の問題点としては、「画面に補足説明を書き込めない」という意見があったが、これに

関しては即座に本システムのソフトウェアを改良し、対応した。「自分で操作しないのでわからないうちに先に進んでしまう」といったペースの問題については個人の自習用として対応する必要がある。これは次の動作環境に関係する問題である。ノート形パーソナルコンピュータに本システムが乗れば、これを用いて自習したいと思うか? という質問に対しては、94%の学生が乗せてみたいと回答し、本システムに対する関心の高さを示している [表1(Q7)]. また、本システムの有効性の調査とは少し離れるが、表1(Q8)のようなマルチメディア利用の研究に対する学生の興味を探る質問も行った。これによるとぜひやってみたいとの回答が5名と学生にとって魅力のある研究分野であ

Table 1 The result of questionnaire

Q1 本システムでは物体の変形の可視化(伸び、はりの曲げなど)を行っています。分かりやすかったですでしょうか?

| 回答内容 | 人数 | 割合% |
|------------|----|-----|
| 大変理解しやすい。 | 18 | 53 |
| ある程度理解できた。 | 15 | 44 |
| わからない。 | 1 | 3 |

Q2 実験の疑似体験(引張試験など)は材料の破壊までの挙動を理解する上で分かりやすかったですでしょうか?

| 回答内容 | 人数 | 割合% |
|------------|----|-----|
| 大変理解しやすい。 | 12 | 35 |
| ある程度理解できた。 | 19 | 56 |
| わからない。 | 3 | 9 |

Q3 応力成分の定義などで3次元CGによるインタラクティブな説明をしましたが、理解しやすかったですでしょうか?

| 回答内容 | 人数 | 割合% |
|---------------------------------|----|-----|
| 大変理解しやすい。 | 15 | 44 |
| ある程度理解できた。 | 16 | 47 |
| わからない。 | 2 | 6 |
| アンケートの質問の意味(インタラクティブの意味)がわからない。 | 1 | 3 |

Q4 今回は従来方式の授業の後でその内容のまとめに本システムを用いたり、授業の最初に前回の講義の復習に本システムを用いました。このような授業の進行は従来の講義に比べ分かりやすいですか?

| 回答内容 | 人数 | 割合% |
|-------------|----|-----|
| 大変理解しやすい。 | 11 | 32 |
| ある程度理解しやすい。 | 21 | 62 |
| 代わり映えない。 | 2 | 6 |

Q5 講義にマルチメディア教育システムを用いる場合の利点は何ですか?(複数回答可)

| 回答内容 | 人数 |
|---|----|
| 画像(3次元CG)・アニメーション・映像等を用いて教科書や黒板では記述しにくかった現象が理解しやすくなる。 | 31 |
| 講義に興味を持つことができる。 | 13 |
| 実験の疑似体験を行うことができる。 | 4 |
| ボタンに反応する絵などのインタラクティブな説明がわかりやすい。 | 3 |

Q6 講義にマルチメディア教育システムを用いる場合の問題点があれば書いてください。

| 回答内容 | 人数 |
|---|----|
| TV画面が小さい、見えにくい、字を大きく、など。 | 5 |
| 理解しないうちに次に変わる。 | 2 |
| パソコンを準備する必要があるので講義全体に使えない(できれば毎時間使って欲しい)。 | 1 |
| 設備(パソコン)の値段が高い。 | 1 |
| 自分の意思で前後を見られない。 | 1 |
| 画面に補足説明を書き込めない。 | 1 |
| 見ているだけで覚えようとしない。 | 1 |
| ソフトとハードが学生所有のパソコンに対応できていないので自宅で使えない。 | 1 |
| Windowsでない。 | 1 |
| 講師が必要でなくなってしまう。 | 1 |
| 講義の内容がわからない。 | 1 |
| 眠くなる。 | 1 |

Q7 皆さんのノート型パソコンに本システムが乗れば、これを用いて自習したいと思いますか?

| 回答内容 | 人数 | 割合% |
|-------------|----|-----|
| ぜひ乗せて自習したい。 | 17 | 50 |
| 一応乗せて見たい。 | 15 | 44 |
| あまり興味が無い。 | 1 | 3 |
| 全く関心が無い。 | 1 | 3 |

Q8 本システムは卒業研究の4年生が中心になって製作したものです。皆さんも、自分でこのようなマルチメディア教育研究システムを製作してみたいと思いますか?

| 回答内容 | 人数 | 割合% |
|-----------|----|-----|
| ぜひやってみたい。 | 5 | 15 |
| 一応興味はある。 | 18 | 53 |
| あまり興味が無い。 | 9 | 26 |
| 全く関心が無い。 | 2 | 6 |

ることがわかる。

4・3 マルチメディア教育システムの利点と問題点
アンケート調査結果、および、著者らが実際に本システムを利用した経験により、マルチメディア教育システムの有効性についてまとめると以下ようになる。

(1) マルチメディア教育システムにおけるアニメーションやCGを用いた可視化・実験の擬似体験・インタラクティブな機能によって、従来の講義に比べ学生の理解を高める講義が可能となる。なかでも三次元CG・アニメーション等のグラフィカルな部分に関しては、学生の興味を引き起こし、学習に対する意欲を持続させる効果がある。理解を助ける教育手段として本システムはかなり効果的であるといえる。

(2) 本システムでは開発環境としてパーソナルコンピュータ上のオーサリングツールを選択した。パーソナルコンピュータ上で動作するシステムとすることにより、現状では他の環境と異なり、学生の自習に利用できるという大きな利点がある。学生が個人で自習に用いることのできる環境を整えば、インタラクティブの特徴を最も発揮できる場が与えられることになり、学生自身が興味を持ったことを選び出して自分でそれらの資料を納得のゆくまで見ることのできるような環境を実現できる。なお、今後のWindowsの普及やInternetの発展に伴い、マルチプラットフォームで動作するシステムを考えて行く必要がある。

(3) デジタルの加工・反復性などを利用することにより、教師の側の労力が削減される。

今回のアンケートから、本システムは学生の理解を助ける、興味をもたせるといった点において期待以上の結果を得ることができた。また、学生からの提案として「教育システムはこのような方向に向かうべき」、「他の教科でもやって欲しい」といった意見があり、学生のマルチメディア教育システムに対する要望は高くなっていると分析できる。

一方、マルチメディア教育システムの問題点は、

(1) 講義において、マルチメディア教育システムのような新しいメディアを用いるためには、各講義室に高品質なディスプレイシステムや大きなスクリーンにビデオ画面が映し出せるような施設が必要となる。学生のマルチメディア教育システムに対する要望もあり、今後このような施設の整備が望まれる。

(2) インタラクティブなシステムとは、積極的な学習者が求める情報を提供する場合にその機能を発揮するものであり、消極的な学習者に対してはその威力を発揮できない。居眠りを始めてしまった学生にチョ

ークを投げて起こすことは不可能である。本質的にこの教育システムは教師を越えることはできないといえる。

(3) 教師が黒板に書いたものを目で追い、ノートに写し取る、という作業は理解する上で効果的な手段の一つである。したがって、このような作業をスポイルしてしまうような使用方法はあまり好ましくない、などである。

マルチメディア教育システムには以上のような問題点もあるが、本システムを教師の助手として補助的に使うことにより、教育に大きな効果を挙げることができると考えられる。

5. 結 言

マルチメディアの特徴、中でもアニメーション等による視聴覚効果とインタラクティブ性の組合せは、学生の理解を高める上で効果的かつ柔軟性に富んだ手段である。本研究では、現在のパーソナルユースの機器で、マルチメディアの特徴を活かした実用に耐えうる教育システムが開発可能であることを明らかにした。本システムは授業用の教材として、学生の理解を助け、興味をもたせるといった点において期待以上の効果を発揮した。さらに、自習用の教材として既存メディアにはない能力を発揮することができると考える。

付 録

マルチメディアの特徴別に再編集したデモ版(Macintosh用)を下記にて配布しております。

ftp://ftp.shp.ynu.ac.jp/pub/multimedia_project/ZairikiDemol.Ob.sea.hqx

文 献

- (1) 日興リサーチセンター編、図解マルチメディアのすべて、(1994)、東洋経済新報社。
- (2) アラン・ケイほか(浜野保樹訳)、マルチメディア、(1993)、岩波書店。
- (3) デジタル社会研究会編、時代の流れがまるごとわかるマルチメディア・ダス、(1994)、囃囃社出版。
- (4) 辻知章・木村秀和・野田直剛、マルチメディアを用いた材料力学教育の試み、機論、61-591、A(1995)、2514-2579。
- (5) 杉原義得、図解マルチメディア、(1994)、27、中経出版。
- (6) バーチャルリアリティの実用的システム構築法、PIXEL No.148(1995/1)。
- (7) 高木トシミツ著(データクラフト編)、マルチメディアクリエイターに捧ぐ Macro Media DIRECTOR 読本、(1993)、トッパン。
- (8) プロフォースシステム、Macro Media DIRECTOR A to Z、(1994)、ピーエヌエヌ。

2. 船体構造損傷情報の体系的整理

- 2. 1 マルチメディアによる船体損傷データベースの構築
- 2. 2 座屈・凹損に関する損傷情報

2. 1 マルチメディアによる船体損傷データベースの構築



マルチメディアによる船体構造教育システム

正員 川村 恭己*¹⁾・正員 角 洋一*¹⁾
正員 廣田 一博*²⁾・正員 山田 英城*³⁾
正員 本間 芳雄*⁴⁾・ 鈴木 健大*⁵⁾

1 はじめに

材料力学・構造力学等の教科においては、物体の変形と作用する内力（断面力、応力など）の概念の理解が重要である。さらに、船体構造力学等のより応用的な教科においては、それらの概念の理解に基づいて、より実際の構造（平板、補強板など）の強度や各種損傷モードに対する設計限界を理解し、合理的な構造設計を行うための知識を学ぶことになる。これらの教科は、現象の可視化性に乏しい場合も多く、また内力等の概念はそもそも極めて抽象的であり、初学者にしばしばわかりにくい印象を与えてきたと思われる。

ところで、最近のコンピュータハードウェア・ソフトウェアの進歩にともない、文字/静止画/動画/音声などの各種メディアをコンピュータ上で融合したマルチメディアが日常的に使われるようになってきた。教育の分野においても、学生の理解を容易にするために、マルチメディアを授業や教材に役立てようとする試みが行われつつある¹⁾²⁾。著者らは、材料力学教育、及び、船体構造教育のために、マルチメディアを用いた教材の開発を行ってきた^{3)~5)}。具体的には、講義や学生実験のガイダンスや学生の自習に用いることができる、インタラクティブなデジタルムービーを制作している。前報³⁾では、材料力学教育システムについて報告したが、本稿では船体構造教育システムについて紹介する。また、マルチメディア教育システム（材料力学教育版）を実際に授業等で使用してみた経験をベースにその有効性、限界、学生の反応について述べる。

2 マルチメディアソフトウェアの制作

2.1 オーサリングソフトウェアによる制作

船体構造教育のためのマルチメディアシステムの制作にあたっては、前報と同様に³⁾、パーソナルコンピュータ（パソコン）上でオーサリングソフトウェアを用いている。この方法では、ハイパーテキストの概念により情報のある部分が内容のつながりを持って互いにリンクし、リンクをたどって自由に情報を取り出すという機能をもった、パソコン上で動作するソフトウェア構築が行える。また、アニメーションなども簡単に作成することができ、比較的容易にユーザーとの高度なインタラクティブ性を持つシステムを実現できる。

制作の具体的な手順としては、(1) シナリオ作り、(2) シナリオに基づいた文字・静止画・動画・音声の各種デジタル素材を制作または収集、(3) 素材をオーサリングソフトウェア上で編集統合しインタラクティブなシステムを制作する、となる。パソコンとしてはビデオ映像の取り込みが可能な Power Macintosh (AV シリーズ) を用い、オーサリングソフトウェアとしては Macromedia 社の Director を用いた。また、素材の制作にあたっては、主に、以下の手法を用いている。

- (1) ドロー系・ペイント系ソフトウェアによる2次元静止画の作成、
- (2) オーサリングソフトウェア上で静止画を素材としたアニメーション作成
- (3) 3次元ソフトウェア上で船体構造をモデル化し、3次元コンピュータグラフィックス (CG) 画像データや3次元アニメーションの作成
- (4) スキャナーを用いた写真等の画像取り込み
- (5) 取材等で撮影した映像やビデオ映像のデジタル化

2.2 Internet の利用

最近の Internet の普及に伴い、WWW を工学教育

*1) 横浜国立大学工学部

*2) 三菱重工業(株)造船設計部船殻設計課

*3) 石川島播磨重工業(株)船舶海洋事業本部

*4) ABS PACIFIC

*5) (株)マクニカ

表 1 船体構造教育システム目次

| 船体構造博物館 | | 船体損傷事例データベース | | |
|---------------------------------|----------------------|-------------------|----------------|-------------|
| 船の博物館編 | 船体構造編 | き裂編 | 腐食編 | 事故映像 |
| バルクキャリア | バルクキャリア | バルクキャリア | バルクキャリア | バルクキャリア |
| 石炭専用運搬船 | 一般配置図 | 貨物区域 | 貨物区域 | 貨物区域 |
| コンテナ船 | 3次元モデルによる部材説明 (貨物区域) | 横隔壁区域 | 横隔壁区域 | 横隔壁区域 |
| RO/RO船 | 横隔壁区域 | 上甲板区域 | 上甲板区域 | 上甲板区域 |
| 自動車専用運搬船 | 上甲板区域 | 船底区域 | 船底区域 | 船底区域 |
| カーフェリー | 船底区域 | 船側区域 | 船側区域 | 船側区域 |
| チップ専用運搬船 | 船側区域 | タンカー | タンカー | タンカー |
| タンカー | タンカー | 船底部中心線縦桁 | 上甲板区域 | 上甲板区域 |
| LNG船 | 構造部材の機能解説 | 上甲板付近 | 船底区域 | 船底区域 |
| 鉱石兼搬積み運搬船 | タンカーのダブルハル化 | 縦通隔壁付近とストラット | 船側区域 | 船側区域 |
| | 3次元モデルによる部材説明 | ストラット | LNG船 | LNG船 |
| | シングルハルタンカー | 水平桁と線側横桁の交差部 | LPG船 | チップ専用運搬船 |
| | 上甲板と縦通隔壁区域 | 横隔壁と線側縦通肋骨の交差部 | 腐食状態別 | 腐食状態別 |
| | 船側区域 | 横隔壁と水平桁の交差部 | | |
| | 横隔壁区域 | | | |
| | 船底区域 | | | |
| | ダブルハルタンカー | | | |
| | 船側区域 | | | |
| | 船底区域 | | | |
| 建造工程編 | | | | |
| 全体の流れ | | 材料の破損と腐食 | 縦強度と横強度 | |
| 基本設計 | | 材料の静的強度 | 縦強度 | |
| 詳細設計および工程管理図表 | | 疲労 | 横強度 | |
| 船殻工作 (小組立、大組立、総組立、現場工程) | | 腐食 | 船体に加わる力 | |
| マーキング 曲げ加工 ブロックの種類 組立工法 搭載 展開方式 | | 破壊力学の概要 | 波浪荷重と衝撃圧 | |
| ぎ装工作 | | 応力拡大係数とクラック先端の塑性域 | | |
| 試運転 | | 脆性破壊 | | |
| | | 疲労クラックの成長 | | |

に利用する試みも行われている³⁾。著者らも、WWWを用いた船体構造教育用の教材の制作を試みている⁵⁾。また、オーサリングソフトウェアで制作した上記システムの場合も Director で作成したムービーを、Shockwave を使い WWW に対応させることができる⁶⁾。しかしながら、情報インフラが十分整備されていない現状での WWW では、動画やアニメーションを用いることは難しく、静止画を用いたシステムが現実的であろう。将来的には、このような制約は取り除かれ、ネットワークを利用した教育が行われるようになっていくと思われる。

3 船体構造教育のためのシステムの構築

3.1 船体構造教育

船体構造教育のためのシステム構築にあたっては、以下の点を考慮した。

(1) 多種多様な船舶の構造配置の3次元的特徴の理解

3次元の複雑な船体構造は、製図などをはじめとする図面や教科書・黒板により説明が行われているが、実際にどのような構造をしているかを幾何学的に認識するのは容易ではない。そこで、船体構造の認識が容易となるようにマルチメディアを用いたシステムが構築できれば、学生の理解を助け、学生の興味を引き起こ

す効果があるのではないかと考えらる。

(2) 構造配置と各部材の力学的役割の理解

船体構造を教育する場合には、単に3次元構造配置を認識できるシステムを構築するだけでなく、同時にその力学的な理解を促すようなシステムが望ましい。具体的には、船体の強度や材料、荷重、破壊力学に関する知識を身に付けられるシステムとする。

(3) 船体の損傷に関する理解

海難事故等の例からも認識されるように、船体強度に関する教育においては、損傷に関する知識が重要である。すなわち、き裂・腐食・座屈などの損傷の発生箇所やその形態、及び、発生原因を理解するための知識の教育が必要である。また、これらの知識は構造配置や各部材の力学的役割と有機的に関連付けられなければならない。従来、このような面倒なことは避けたいという教える側の願望もあり、この問題は企業内教育に先送りされてきた。この種の教育は言ってみれば医学教育において最初に人体解剖を行い、骨や臓器の配置と役割を実際に見ることに相当しており、船体構造教育のプロセスにおいて一度は経験すべき教育内容であると考えている。

以上のような背景から、本システムは以下の3つのサブシステムから成る構成とした。表1にそれぞれにおいてカバーされている内容を示す。

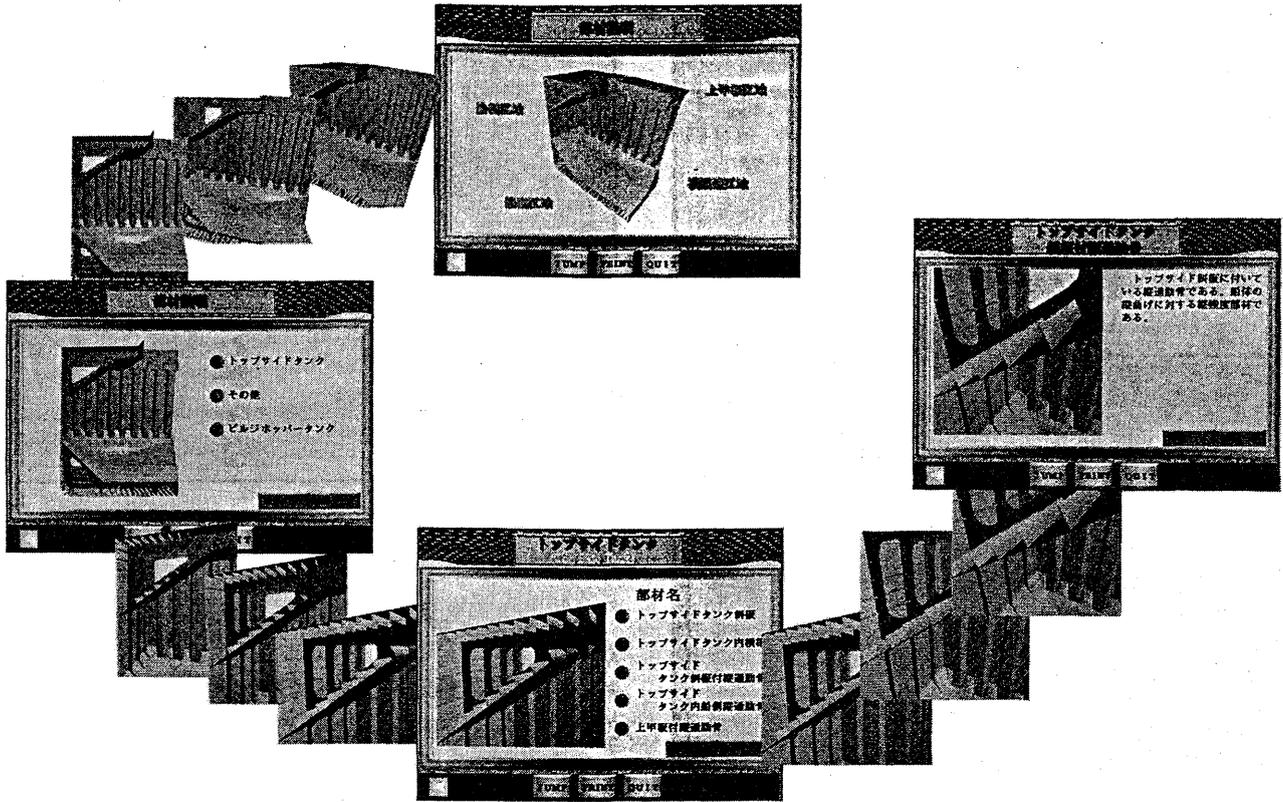


図1 ズームアップによる部材説明

●船体構造博物館

船舶の種類別の解説、写真、主要目等のデータを集めた一般解説部分と、船体の内部構造（一般配置図・構造配置・部材配置）説明部分から成る。

●船体損傷事例データベース

船体部材別に疲労き裂損傷と腐食衰耗の事例を解説したものである。

●船体構造力学

従来の教科書⁷⁾を電子本化し、「船体構造博物館」と「船体損傷データベース」にリンクし、相互関連付けたシステムとした。

3.2 システムの概要

船体構造教育システムの制作においては、材料力学教育システムと同様に、マルチメディアの特徴であるインタラクティブ性やビジュアルな側面を活用するように心がけた。ここでは、各サブシステム別にムービーの特徴的な部分を紹介する。

(1) ズームアップによる形状認識（船体構造博物館）

バルクキャリア及びタンカー（現在のところ中央部のみ）における構造部材説明を、4つの区域（上甲板・横隔壁・船側・船底区域）に分けて行っている。

図1のように、3次元モデルを用いて貨物倉から各構造部材まで段階的にズームアップしていくことにより、複雑な3次元構造の位置や形状を認識しやすいようにしている。さらに、個々の部材の説明に必要な船体構造力学に関する知識を引き出せるように、部材説明の画面から船体構造力学の解説画面を呼びだせるように工夫している。

(2) 損傷事例のデータベース化とビジュアル化

腐食やき裂等の代表的な船体損傷を、腐食は写真⁸⁾、き裂はデータシート等の資料⁹⁾¹⁰⁾を基に作成した3次元モデルを用いて解説している。具体的には、構造部材説明と同様に、ズームアップにより部材にアクセスし、損傷箇所が把握しやすいようになっている（図2）。き裂損傷においては、き裂進展の様子をアニメーションにより表示し、損傷形態を的確に認識できるように工夫している。腐食状況についてはカラー写真を用いた解説としている。さらに、本システムでは、実船損傷事故の映像資料を合わせて見ることができ、損傷を理解し、強度限界を把握することの重要性を教えることができると考えている。また、船体構造力学の画面とリンクを張ることにより、損傷の理論（原因等）も合わせて習得できるようになってい



図 2 き裂損傷事例解説画面の例

る。

(3) 変形挙動等のアニメーション化 (船体構造力学)

「船体は底部および船側外板から静的及び動的水圧を受け、また船体内部からは積荷等による荷重を受ける。時にはさらに甲板上に打ち上げられた波浪あるいは甲板上的貨物などによる荷重が加わることもある。これらの荷重により船体の横断面は変形する。」これは、教科書における船体構造力学の解説文章の例であるが、この文章からどのような荷重がかかりどのような変形が生じるかイメージすることは初学者にとっては困難であろう。そこで、変形の様子を 3 次元モデルを用いたアニメーションで解説し、現象のイメージをつかみやすいように工夫した (図 3)。このように、船体構造力学の理論を電子本化し 3 次元モデルやアニメーションを多用することにより学生が興味を持つのではないかと期待している。

本船体構造教育システムは、現状ではシステムの骨格ができたところであり、今後さらに充実させる予定

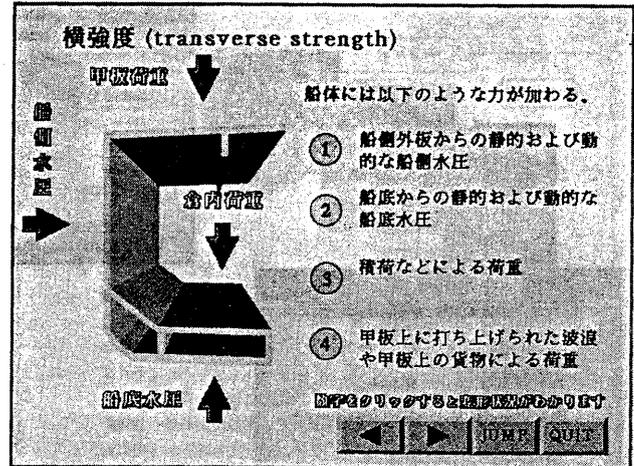


図 3 船体構造力学 (アニメーションの例)

である。

4 マルチメディアシステム利用の効果と問題点

4.1 利用形態と教える側の有効性

材料力学及び船体構造教育システムは、講義用または学生自習用として制作された。現状では、本教室の学生全員が所持するノート型パソコンには対応していないので、講義にのみ使用している。ここでは、前報で紹介した材料力学教育システムを講義の一部に使用した際の経験から、マルチメディアシステム利用の有効性と問題点について述べる。

前報の材料力学教育システムにおいては、マルチメディアの特徴を生かして、「アニメーションによる物体の変形の可視化」・「式変形のアニメーション化」・「実験の疑似体験」・「インタラクティブな解説」等を取り入れたシステムとなっている³⁾。利用法としては、

(1) 授業開始時の導入部分で、前回講義の要点を本システムにより説明し、学生の記憶を呼び起こす、

(2) 授業そのものは黒板を用いた伝統的板書形式で行い、学生がノートをとることができるようなペースで話をするが、内力の概念、変形、破壊などについては、材料力学教育システムのビジュアルな映像を板書に替えて随時使用する、

(3) 授業の最後に、システムによって簡明な講義のサマリーを行う、などである。

教室には 2 台の 29 インチ・ビデオモニターがあるので、ビデオ出力のあるパソコン本体を持ち込み、モニターに直結してパソコンのモニター画面を出力することができた (図 4)。大画面の液晶プロジェクター

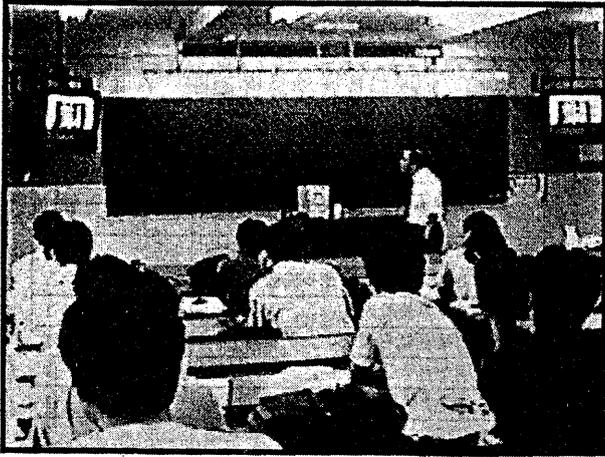


図4 授業風景

などがあれば、さらに教育環境は向上するであろう。

教える側の立場からは、(1)で要領よく自然に本題に入ることができる。また(2)では、複雑な図を板書する時間が節約でき、また破壊現象などは映像を随時、また必要に応じて繰り返し見せることができるという利点がある。従来のビデオ映像でこのようなことを行おうとすると、頭出しに時間をとられ実用的でないが、マルチメディアのインタラクティブ性による操作性の良さを実感できる点である。(3)におけるシステムの利用法は、基本的には(1)におけるものと同様であるが、変形などの物理現象に加え、応力の定義、式の変形など複雑な説明を要領良くサマリーできることが挙げられる。教える側としてシステムを講義に用いることによる不都合は特に無かった。

4.2 学生の反応

一方、学生の反応を調査するためアンケートを行った。アンケートの対象とした学生は材料力学I・演習の講義受講者(34人)である。以下にアンケート結果を示す(表2)。

物体の変形の可視化に関し、全体の97%の学生が大変理解しやすい、または、ある程度理解できたと答えている(表2(Q1))。実験の擬似体験についての質問に対しては、全体の91%の人が理解できると回答している(表2(Q2))。システムのインタラクティブな機能については、全体の91%の学生から理解しやすいとの回答を得た(表2(Q3))。講義のまとめにシステムを利用することに対する質問では、全体の94%の学生より、「ある程度理解できた」、または、「大変理解しやすい」という回答を得られた(表2(Q4))。続いてマルチメディア教育システムの利点を問う質問では、「画像(3次元CG)・アニメーシ

ョン・映像を用いることにより教科書や黒板では記述しにくかった現象が理解できる」「マルチメディアにより講義に興味を持つことができる」等、システム導入の目的にかなった回答が多く出た(表2(Q5))。マルチメディア教育システムの問題点については、表2(Q6)のような意見が寄せられた。最も多かったのは、「TV画面が小さくて文字が見づらい」という意見であった。これは、システムを講義で使用する際のTV画面が29インチと講義用には小さく、良く見えなかった学生が多かったためである。他の問題点としては、「画面に補足説明を書き込めない」という意見があったが、これに関しては即座に本システムのソフトウェアを改良し、対応した。「自分で操作しないので解らないうちに先に進んでしまう」といったペースの問題については個人の自習用として対応する必要性がある。これは次の動作環境に関係する問題でもある。ノート型パソコンに本システムが乗れば、これを用いて自習したいと思うか?という質問に対しては、94%の学生が乗せてみたいと回答し、システムに対する関心の高さを示している(表2(Q7))。また、システムの有効性の調査とは少し離れるが、表2(Q8)の様なマルチメディア利用の研究に対する学生の興味を探る質問も行った。これによるとぜひやってみたいとの回答が5名と学生にとって魅力のある研究分野であることがわかる。

4.3 教育へのマルチメディア利用の利点と問題点

アンケート調査結果、及び、著者らが実際にシステムを利用した経験により、マルチメディア教育システムの有効性についてまとめると以下ようになる。

(1) マルチメディア教育システムにおけるアニメーションやCGを用いた可視化・実験の擬似体験・インタラクティブな機能等によって、従来の講義に比べ学生の理解を高める講義が可能となる。なかでも3次元CG・アニメーション等のグラフィカルな部分に関しては、学生の興味を引き起こし、学習に対する意欲を持続させる効果がある。理解を助ける教育手段として本システムはかなり効果的であるといえる。

(2) システム構築には、開発環境としてパソコン上のオーサリングソフトウェアを用いる方法を選択した。パソコン上で動作するシステムとすることにより、現状では他の環境と異なり、学生の自習に利用できるという大きな利点がある。学生が個人で自習に用いる事のできる環境が整えば、インタラクティブの特徴を最も発揮できる場が与えられる事になり、学生自身が興味を持ったことを選び出して自分でそれらの資

表 2 学生に対するアンケート結果

Q1 本システムでは物体の変形の可視化(伸び、はりの曲げなど)を行っています、分かりやすかったですでしょうか?

| 回答内容 | 人数 | 割合% |
|------------|----|-----|
| 大変理解しやすい。 | 18 | 53 |
| ある程度理解できた。 | 15 | 44 |
| わからない。 | 1 | 3 |

Q2 実験の疑似体験(引張試験など)は材料の破壊までの挙動を理解する上で分かりやすかったですでしょうか?

| 回答内容 | 人数 | 割合% |
|------------|----|-----|
| 大変理解しやすい。 | 12 | 35 |
| ある程度理解できた。 | 19 | 56 |
| わからない。 | 3 | 9 |

Q3 応力成分の定義などで3次元CGによるインタラクティブな説明をしましたが、理解しやすかったですでしょうか?

| 回答内容 | 人数 | 割合% |
|---------------------------------|----|-----|
| 大変理解しやすい。 | 15 | 44 |
| ある程度理解できた。 | 16 | 47 |
| わからない。 | 2 | 6 |
| アンケートの質問の意味(インタラクティブの意味)がわからない。 | 1 | 3 |

Q4 今回は従来方式の授業の後でその内容のまとめに本システムを用いたり、授業の最初に前回の講義の復習に本システムを用いました。このような授業の進行は従来の講義に比べ分かりやすいですか?

| 回答内容 | 人数 | 割合% |
|-------------|----|-----|
| 大変理解しやすい。 | 11 | 32 |
| ある程度理解しやすい。 | 21 | 62 |
| 代わり映えしない。 | 2 | 6 |

Q5 講義にマルチメディア教育システムを用いる場合の利点は何ですか?(複数回答可)

| 回答内容 | 人数 |
|---|----|
| 画像(3次元CG)・アニメーション・映像等を用いて教科書や黒板では記述しにくかった現象が理解しやすくなる。 | 31 |
| 講義に興味を持つことができる。 | 13 |
| 実験の疑似体験を行うことができる。 | 4 |
| ボタンに反応する絵などのインタラクティブな説明がわかりやすい。 | 3 |

Q6 講義にマルチメディア教育システムを用いる場合の問題点があれば書いてください。

| 回答内容 | 人数 |
|---|----|
| TV画面が小さい、見えにくい、字を大きく、など。 | 5 |
| 理解しないうちに次に変わる。 | 2 |
| パソコンを準備する必要があるので講義全体に使えない(できれば毎時間使って欲しい)。 | 1 |
| 設備(パソコン)の値段が高い。 | 1 |
| 自分の意思で前後を見られない。 | 1 |
| 画面に補足説明を書き込めない。 | 1 |
| 見ているだけで覚えようとしない。 | 1 |
| ソフトとハードが学生所有のパソコンに対応できていないので自宅で使えない。 | 1 |
| Windowsでない。 | 1 |
| 講師が必要でなくなってしまう。 | 1 |
| 講義の内容がわからない。 | 1 |
| 眠くなる。 | 1 |

Q7 皆さんのノート型パソコンに本システムが乗れば、これを用いて自習したいと思いますか?

| 回答内容 | 人数 | 割合% |
|-------------|----|-----|
| ぜひ乗せて自習したい。 | 17 | 50 |
| 一応乗せて見たい。 | 15 | 44 |
| あまり興味が無い。 | 1 | 3 |
| 全く関心が無い。 | 1 | 3 |

Q8 本システムは卒業研究の4年生が中心になって製作したものです。皆さんも、自分でこのようなマルチメディア教育研究システムを製作してみたいと思いますか?

| 回答内容 | 人数 | 割合% |
|-----------|----|-----|
| ぜひやってみたい。 | 5 | 15 |
| 一応興味はある。 | 18 | 53 |
| あまり興味が無い。 | 9 | 26 |
| 全く関心が無い。 | 2 | 6 |

料を納得のゆくまで見ることで見るような環境を実現できる。なお、今後の Windows の普及や Internet の発展に伴い、マルチプラットフォームで動作するシステムを考えて行く必要がある。

(3) デジタルの加工・反復性などを利用することにより、教師の側の労力が削減される。

今回のアンケートから、材料力学教育システムは学生の理解を助ける、興味を持たせるといった点において期待以上の結果を得る事ができた。また、学生からの提案として「教育システムはこのような方向に向か

うべき」、「他の教科でもやって欲しい」といった意見があり、学生のマルチメディア教育システムに対する要望は高くなっていると分析できる。

一方、マルチメディア教育システムの問題点は、

(1) 講義において、マルチメディア教育システムのような新しいメディアを用いるためには、各講義室に高品質なディスプレイシステムや大きなスクリーンにビデオ画面が映し出せるような施設が必要となる。学生のマルチメディア教育システムに対する要望もあり、今後このような施設の整備が望まれる、

(2) インタラクティブなシステムとは、積極的な学習者が求める情報を提供する場合にその機能を発揮するものであり、消極的な学習者に対してはその威力を発揮できない。居眠りを始めてしまった学生にチョークを投げて起こすことは不可能である。本質的にこの教育システムは教師を越えることはできないといえる、

(3) 教師が黒板に書いたものを目で追い、ノートに写し取る、という作業は理解する上で効果的な手段の一つである。したがって、このような作業をスポイルしてしまうような使用方法はあまり好ましくない、などである。

マルチメディア教育システムには以上のような問題点もあるが、「システムを教師の助手として補助的に使う」ことにより、教育に大きな効果を挙げることができると考えられる。

5 おわりに

本稿では、オーサリングソフトウェアを用いて制作したパソコン上で動作する船体構造教育システムについて紹介した。また、材料力学教育システムを講義で利用した経験から、教育へのマルチメディア利用が効果的であることをある程度示すことができたと思う。今後、船体構造教育システムも、講義の補助として、また、できれば学生の自習用の教材として活用して行きたいと考えている。本システムの制作は現在も続けられており、船体の建造工程¹¹⁾や座屈損傷、船体の事故史について解説するムービーの制作を予定している。

ムービーの制作は大変労力のかかるものではある

が、完成したときの喜びもまた大きい。制作された作品が有効活用できることを望んでいる。

参 考 文 献

- 1) 辻, 木村, 野田: マルチメディアを用いた材料力学教育の試み, 日本機械学会論文集 A 編, 61-591 (1995), 2514.
- 2) 赤星保浩: マルチメディアを用いた有限要素教育, 日本機械学会北陸信越支部第33期総会・講演会論文集, 1996, 5-6.
- 3) 川村, 廣田, 山田, 角: 教育におけるマルチメディア利用の試み, 日本造船学会誌, 第 794 号, 平成 7 年 8 月, 575-580.
- 4) 川村, 廣田, 山田, 角: マルチメディアの特性と教育への効果的利用法に関する考察, 日本機械学会論文集 (A 編), 62-603 (1996-11), 2489-2494.
- 5) 鈴木健大, 本間芳雄: マルチメディアとインターネットによる船体構造教育システムの開発, 横浜国立大学工学部船舶海洋工学教室, 卒業論文, 平成 8 年 3 月.
- 6) 上野亨: Shockwave オーサリングテクニック, オーム社, 1996.
- 7) 山本善之, 大坪英臣, 角洋一, 藤野正隆: 船体構造力学, 成山堂書店, 1986.
- 8) Guidance for Corrosion Protection System of Hull Structures -For Water Ballast Tanks and Cargo Oil Tanks-, Second Revision, Nippon Kaiji Kyokai, 1995.
- 9) SR219, 亀裂伝播解析手法の実用化に関する研究(平成5年度報告書), (社)日本造船研究協会, 平成 6 年 3 月.
- 10) 船のメンテナンス研究会編著: 船のメンテナンス技術, 成山堂, 1996.
- 11) 河田真, 松本荘子: マルチメディアによる船体構造教育システムの開発—船体損傷と建造工程教育システム—, 横浜国立大学工学部船舶海洋工学教室, 卒業論文, 平成 9 年 3 月.

2.2 座屈・凹損に関する損傷情報

2.2.1 座屈・凹損に関する損傷情報の概要

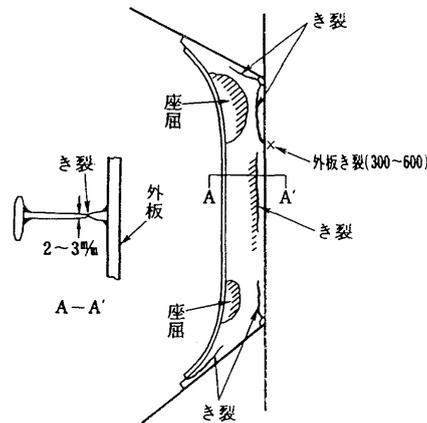


図 1: 倉内肋骨の衰耗損傷例

通常、船体の構造に面内力が作用して面外撓みを生じる場合を「座屈」といい、横荷重が作用して面外撓みを生じる場合を「凹損」というが、両者の破損状況は似ており、荷重が明確でない場合は、「座屈」あるいは「凹損」と一概に言えない場合がある。よって損傷報告においても「座屈損傷」と「凹損」を区別する場合の表現があいまいなときがある。

座屈に関する損傷原因としては誤った積載、衝突、座礁、衰耗、スラミング、進水時等が考えられる。その中でも損傷報告の主な原因に板厚の衰耗がある。この衰耗によって、クラック、座屈、破孔などの新たな損傷を引き起こす。その際にクラックと座屈が同時に発生する例などもある。Fig. 1はバルクキャリアの倉内肋骨の衰耗損傷の例であるが、鉄鋼石、石炭などを積荷とした場合、倉内を塗装しても荷役時の衝撃等で倉内肋骨等では塗膜が剥離しやすく腐食しやすい環境になり、腐食後座屈および亀裂が発生している。また、衰耗により溶接部が完全にはがれ、それにより防撓材を失ったパネルが座屈してしまうような例もある。

高齢船では、元厚が比較的薄い上に、上面に泥錆が堆積する環境にある水平部材のウェブが腐食しやすい。その結果、座屈強度が低下し、剪断応力の高いスパン端部に座屈が発生し、船外からの水圧変動に伴って、この座屈による変形を繰り返している間に、さらに衰耗が加速して座屈が進行し、疲労も蓄積して、座屈部の周縁や頂部に破断をみるようになることが多い。

通常の損傷例は平時の点検、船級協会の検査のとき等に発見される損傷であり、検査の地点では致命的でない場合が多い。その意味で、このような致命的でない座屈損傷に対しては修理の観点からの考察も重要である。過去の学術的文献においても損傷を現象としてとらえるだけでなく、その原因、あるいは対策、補修例をふれているものが多い。特に、最近の文献では有限要素解析により損傷の原因

解明を行っている。座屈後は、部材の耐荷能力が大幅に減少ので、放置すると、ドミノ現象により、広範囲な崩壊につながる可能性がある。発見した損傷をどの時期に補修するかを的確に判断することは重要である。

一方、致命的な損傷に折損、沈没等が考えられる。沈没したときにはその原因は不明確になる場合が多いので資料としては残っていない。また、ハルガーダーの折損の場合には座屈やクラックがあらゆる場所で起こっているわけであるが、最後の折れるという現象に対してのみ調査が詳細になるので、局部座屈やクラックのような初期の軽微な損傷は資料として残っていない場合がある。

2.2.2 縦強度部材の座屈・凹損

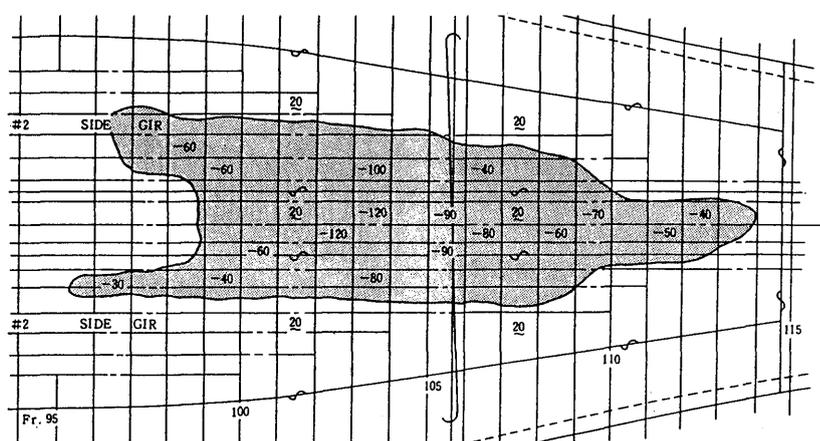


図 2: スラミングによる船首船底部の凹損の例 (マイナス付きの数字は凹損量を表す (mm))

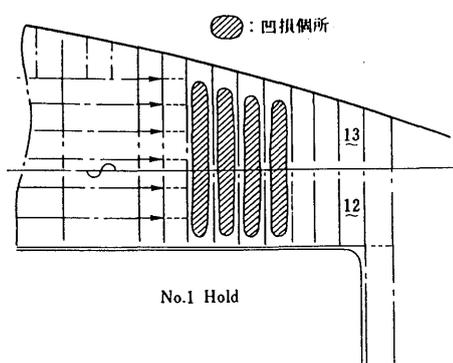


図 3: 船首部上甲板の凹損

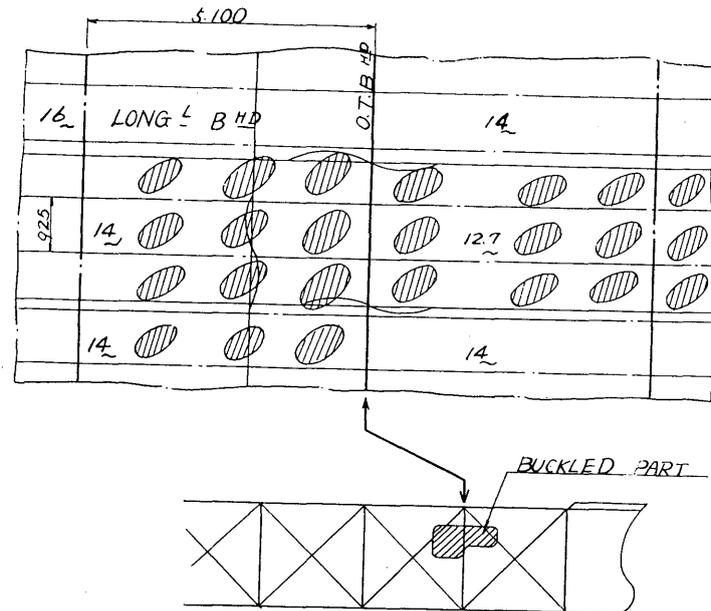


図 4: 縦通隔壁板の座屈例

船首部のフレヤが大きく、また高速で航行する船はスラミングを受けやすく、スラミングによる船首部付近の座屈が発生しやすい。甲板の座屈や船底の凹損などが多数報告されている。スラミングによる座屈・凹損は単に外板パネルが凹入した程度の軽微なものから、特設肋骨ウェブの座屈、小骨の曲損等の著しいものまでである。Fig. 2はスラミングによる船底損傷の例である。広範囲にわたって船底が凹損していることがわかる。

Fig. 3は船首部上甲板の凹損である。この船はばら積兼木材運搬船で、船首部甲板の甲板梁の構造方式が不連続となる個所に凹損を生じていた。これらの損傷は波浪の打ち込みによる場合もあり、そのときは甲板下横桁が屈曲し甲板が凹損する。

Fig. 4は縦通隔壁板の座屈例である。この船はタンククリーニング状態で造船所の作成したローディングマニュアルにない積み付けを行ったので、該部に異常に高い剪断応力が発生し、これがパネルの剪断座屈応力を超えたものであると報告されている。

2.2.3 横強度部材の座屈・凹損

バルクキャリアにおいては上甲板クロスデッキの座屈やトップサイドタンクの座屈が多数報告されている。Fig. 5はトップサイドタンク内トランスウェブのR部に座屈を生じた例である。

Fig. 6は鉱石運搬船舷側タンク横隔壁の剪断座屈の例である。座屈の傾向は荷重条件により変化し、軽荷状態では軽度であるが、満載状態では発生範囲は拡大

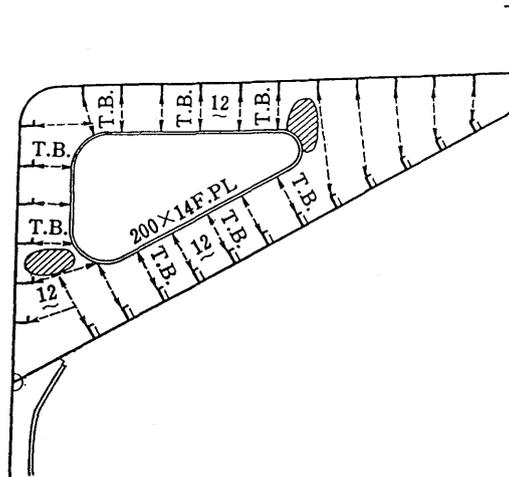


図 5: トップサイドタンク内トランスの損傷

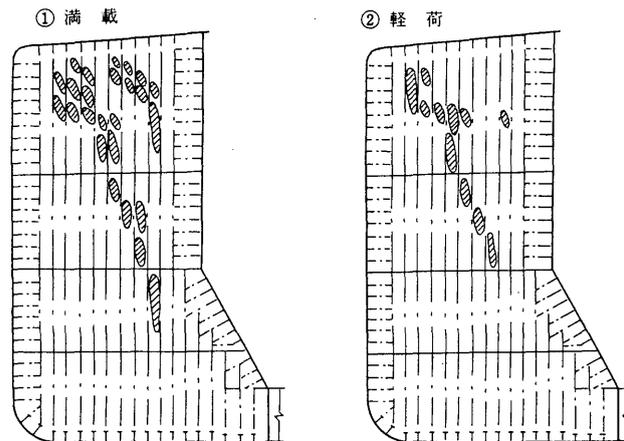


図 6: 鉱石運搬船舷側タンク横隔壁の座屈

していた。このような剪断座屈損傷はタンカーにおいても報告されている。

Fig. 7は肋板の座屈の例である。このように孔の周辺は座屈しやすい。

Fig. 8は制水隔壁板の損傷例である。これも孔の周辺の凹損であり、損傷により、隔壁の剛性は低下してしまう。また、図に示す通り、損傷は凹損ではなく、クラックである場合もある。

Fig. 9はスロット周辺の座屈損傷の例である。桁のウェブの座屈には圧縮座屈と剪断座屈があり、いずれの場合も凹入量が板厚以上ある場合は、カーリングを取り付けて補強を行う必要がある。

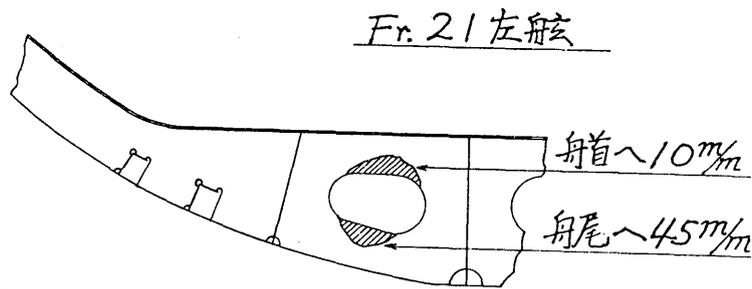


図 7: 肋板の座屈

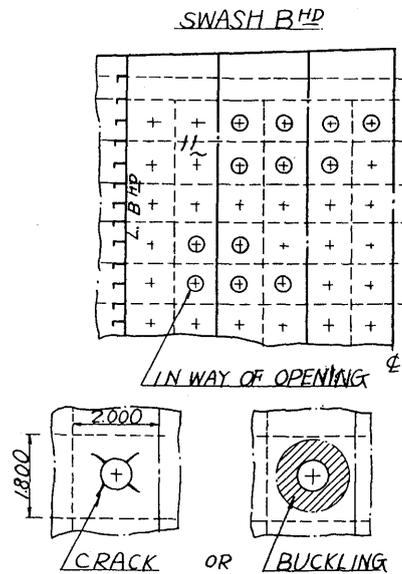


図 8: 制水隔壁板の損傷例

2.2.4 その他の構造の座屈・凹損

Fig. 10に縦ビーム式のクロスデッキで発生した損傷の代表例を示す。バルクキャリアでは漲水状態のトップサイドタンクにおいて、タンク全体が回転変位してクロスデッキは幅方向に圧縮状態となる。これらの損傷は上甲板クロスデッキが縦ビーム式であるために頻繁に生じたものである。その後は、横ビーム式とする対策がとられて損傷は減少しているが、横ビーム式でも発生例が見られる。上甲板クロスデッキの座屈に関してはコンテナ船においても生じている。

Fig. 11は船首楼ピラー、ガーダーの損傷である。ピラーの座屈に伴い、ガーダービームも曲げ変形をおこした例である。

Fig. 12はハッチビーム中央で折れ曲がり、その後船内にハッチビームが落下した例である。このような損傷による構造物の落下は船体のみならず荷物にも損傷を与える危険性がある。

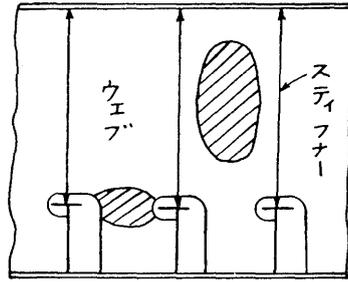


図 9: タンカーの船底ウェブの座屈

Fig. 13はトップサイドタンク斜板に亀裂および凹損が生じた例である。損傷発生時には、バラスト兼用貨物倉にトップサイドタンクの下方約1.5m迄のバラストを張ってあったので、スロッシングの影響が考えられる。

2.2.5 資料図集

以下には、座屈損傷図面の一覧を示す。

- 船級管理部: 1976年の船体統計について、日本海事協会会誌, No.161, (1977).
 - － p.259 図7 船底外板のピッチングコロージョン
- 船級管理部: 1977年の船体統計について、日本海事協会会誌, No.166, (1979).
 - － p.12 図8 ばら積貨物船の代表的な損傷
- 調査解析部: 1992年度の船体損傷のまとめ、日本海事協会会誌, No.226, (1994).
 - － p.15 図3.8 鉱石運搬船の横隔壁の剪断座屈及び補強
- 調査解析部: 1993年度の船体損傷のまとめ、日本海事協会会誌, No.230, (1995) (I).
- 調査解析部: 1994年度の船体損傷のまとめ、日本海事協会会誌, No.234, (1996) (I).
 - － p.45 図5.2 スラミングによる船底外板の凹損
- 日本造船学会誌 787 1995/1 特集: 損傷に学ぶ
 - － p.4 Photo. 1 座屈の分類
 - － p.10 図3.6 スラミングによる船首船底部の凹損の例

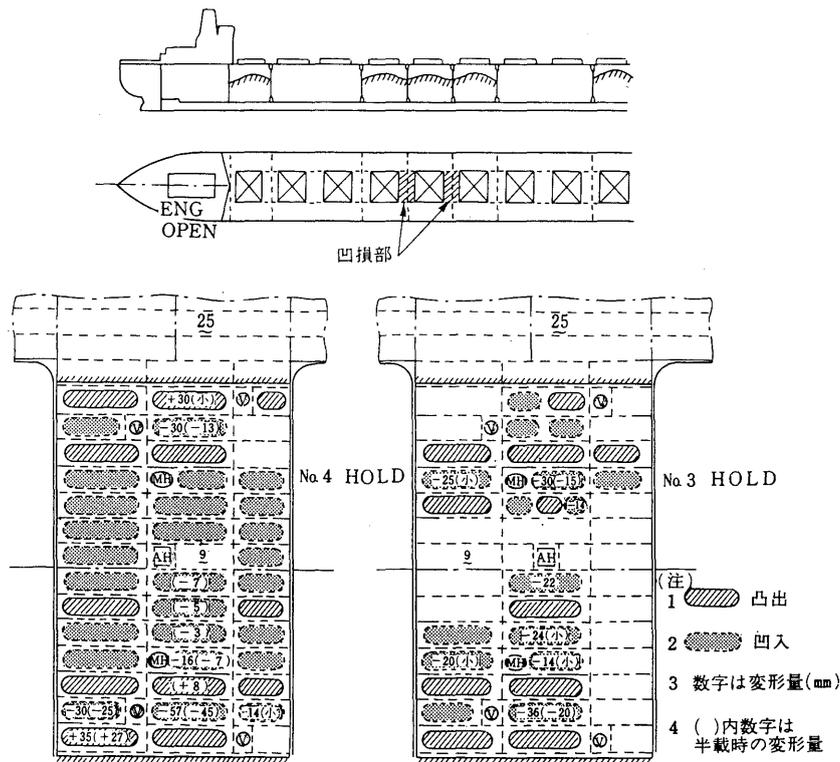


図 10: クロスデッキの座屈

- p.31 図 8 Hold の変形
- p.34 図 3 ホールドフレームとサイドロンジの変形
- 船のメンテナンス技術、船のメンテナンス研究会編著、成山堂
 - p.60 図 2.46 タンカートランスの損傷例、(タンカー)
 - p.93 図 3.41 船首楼甲板下横桁の変形損傷、(鉱石運搬船)
 - p.94 図 3.42 ハッチ側部上甲板の座屈、(一般貨物船)
 - p.95 図 3.43 クロスデッキの座屈、(ばら積貨物船)
 - p.95 図 3.44 鉱石運搬船舷側タンク横隔壁の座屈、(鉱石運搬船)
 - p.121 図 4.1 船側縦通肋骨の損傷
 - p.131 図 4.15 座屈箇所 油タンカー (従来型)
 - p.131 図 4.16 座屈箇所 油タンカー (二重船殻型)
 - p.131 図 4.17 座屈箇所 鉱石運搬船
 - p.131 図 4.18 座屈箇所 ばら積貨物船
 - p.158 表 5.3 典型的な損傷と補強方法

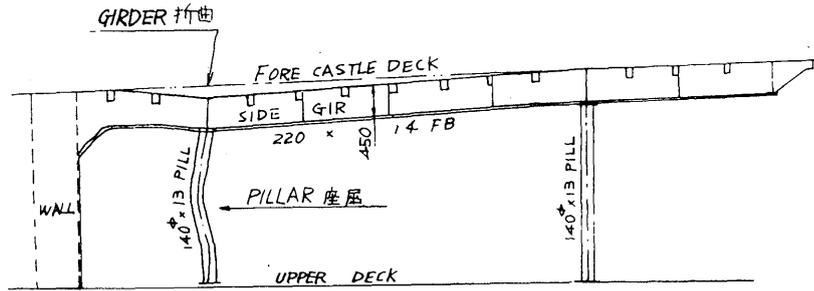


図 11: 船首楼ピラー、ガーダーの損傷

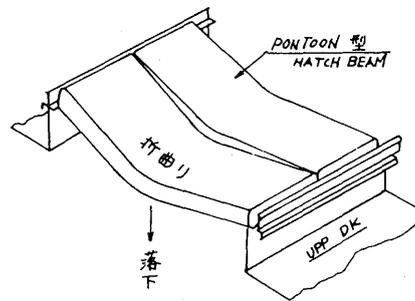


図 12: ハッチビームの破損

- 村井謙二: コンテナ貨物船の船首船側外板の損傷、日本海事協会会誌、No.150 (1975)
 - p.80 図 1 船首部損傷例 (コンテナ船)
- 船級管理部: 自動車運搬船 (PCC) の損傷及び対策 (その 2)、日本海事協会会誌、No.162 (1977)
 - p.53 図 15 自動車倉下二重底タンク内肋骨の損傷 (自動車運搬船)
 - p.53 図 16 自動車倉下二重底タンク内ストラットの損傷 (自動車運搬船)
 - p.60 図 35 アクセストラック周囲の損傷 (自動車運搬船)
 - p.63 図 47 F.P.T. 内の凹損 (自動車運搬船)
 - p.53 図 53 船首船底外板の凹損 (自動車運搬船)
- 船級管理部: 木材チップ運搬船の損傷、日本海事協会会誌、No.166 (1979)
 - p.28 図 34 船首部スポンソンの損傷 (木材チップ運搬船)
- 阿部三雄: NK 船級船の損傷と対策、日本海事協会会誌、No.175 (1981)

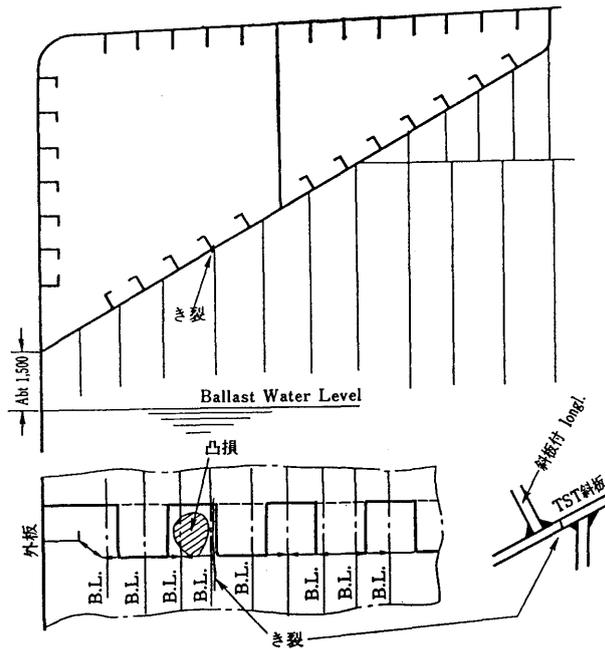


図 13: トップサイドタンク斜板のき裂

- p.19 図 1 スラミングによる船首船底の損傷 (写真) (a) 船底外板の凹損 (b) 肋板の座屈
- p.19 図 2 波浪外力による船首損傷 (写真) (a) 外板の凹損及びき裂 (b) 内部部材の損傷
- 水上知夫、石川一郎: 最近の船体損傷の傾向と対策、日本海事協会会誌、No.227 (1994) (II)
 - p.126 図 24 船首部船側外板の変形損傷 (コンテナ船)
 - p.126 図 25 上甲板クロスデッキの座屈損傷 (ばら積貨物船)
 - p.126 図 26 トップサイドタンク内横桁の座屈損傷
 - p.126 図 27 舷側タンク横隔壁の座屈損傷 (鉱石運搬船)
 - p.130 図 30 桁の座屈損傷に対する補強例
- 今井史彦: 船体損傷の典型的事例とその対策、日本海事協会会誌、No.210 (1990)
 - p.12 図 2.7 外板凹損のカーリングによる恒久的修理の例
 - p.12 図 2.8 内部材を含む外板凹損の恒久的修理の例
 - p.12 図 2.9 外板小破孔の二重張りによる恒久的修理の例
 - p.12 図 2.10 外板の著しい凹損における仮修理の例 (その 1)

- p.13 図 2.11 外板の著しい凹損における仮修理の例 (その 2)
- p.13 図 2.12 全体強度に重要な役割りを果たす外板の板修理
- p.13 図 2.13 全体強度にあまり影響のない外板の板修理例
- p.24 図 3.22 ビット下部上甲板の損傷
- p.28 図 3.30 エンジンルーム 3rd デッキの座屈損傷
- p.29 図 3.33 フォクスルデッキの凹損
- 池田均ほか: ばら積貨物船の損傷、日本海事協会会誌、No.191 (1985)
 - p.46 図 4.1 倉内肋骨の衰耗損傷例
 - p.47 写真 4.1(a) 倉内肋骨 (特設肋骨) の上部の衰耗破口及び座屈
 - p.52 図 4.9 トップサイドタンク内トランスの損傷
 - p.53 図 4.11 トップサイドタンク斜板のき裂
 - p.53 図 4.12 トップサイドタンク内下部ブラケットの損傷
 - p.54 図 4.15 船首部上甲板の凹損
- 大八木正広: 過去の経験から何を学ぶか、日本海事協会会誌、No.202 (1988)
 - p.69 写真 1 衝突事故状況及び船体損傷例
 - p.70 写真 2 座礁、船底接触事故例
 - p.72 写真 4 曲損及び折損の事故例
 - p.72 写真 5 波浪衝撃による局部的損傷事故例
 - p.72 写真 6 慣性力による倉内甲板の事故例
- 船体の損傷とその対策に関するシンポジウム S46.10 日本造船学会
 - p.12 図 1.2.1 ホリゾンタルガーダーの座屈例
 - p.12 図 1.2.2 トランスリングの座屈例
 - p.12 図 1.2.3 センターウェブの座屈例
 - p.12 図 1.2.4 センターウェブ下端部の座屈例
 - p.14 図 1.2.10 制水隔壁板の損傷例 (a)
 - p.15 図 1.2.13 縦通隔壁板の座屈例
 - p.15 図 1.2.14 縦通隔壁板の亀裂例
 - p.16 図 1.2.15 スロット近傍の損傷例
 - p.17 図 1.2.18 防撓材の座屈例 (a)

- p.17 図 1.2.19 防撓材の座屈例 (b)
- p.18 図 1.2.21 船首甲板の凹損例
- p.18 図 1.2.22 船首部外板の凹損例
- p.24 第 6 図 縦通隔壁下部 (船底横桁との取合い付近) のウェブの座屈損傷
- p.24 第 7 図 支材の付根近傍のウェブの座屈
- p.25 第 8 図 船側横桁の損傷
- p.26 第 11 図 倉口間甲板構造に生ずる損傷 (1)
- p.26 第 12 図 倉口間甲板構造に生ずる損傷 (2)
- p.28 第 17 図 貨物倉横隔壁まわりの損傷
- p.38 図 2.4.2 ビルジホッパー内ウェブの剪断座屈の一例
- p.39 図 2.4.4 バルクキャリアの二重底タンクのスチフナの座屈
- p.40 図 2.5.3 トップサイドタンク内のブラケットの座屈
- p.40 図 2.6.1 バルクキャリアのトップサイドタンクのボトムトランスウェブの座屈
- p.41 図 2.6.2 甲板積み木材の荷重によって生じたトップサイドタンクの座屈
- p.41 図 2.6.3 トップサイドタンク内のトランスの座屈
- p.42 図 2.7.2 バルクキャリアのクロスデッキの座屈
- p.47 図 2.10.4 フォーピークタンク内の制水板の損傷
- p.50 第 3 図 船首楼側外板の損傷
- p.51 第 4 図 後部二重底内底板の損傷
- p.59 図 1-a 木材運搬船の船側タンクのウェブプレートの損傷
- p.59 図 3 撒積貨物船の船側タンク内ウェブプレートの座屈
- p.62 図 12 撒積貨物船のトップサイドタンクの座屈
- p.66 図 23 貨客船のスラミングによる凹損
- p.66 図 24 硫化鉍運搬船の波浪衝撃による凹損
- p.81 Fig. 1 艦艇における船首船底部の損傷例 (凹損図 1)
- p.81 Fig. 2 艦艇における船首船底部の損傷例 (肋骨の座屈)
- p.82 Fig. 3 艦艇における船首船底部の損傷例 (凹損図 2)
- p.82 Fig. 4 艦艇における船首船底部の損傷例 (凹損図 3)

- p.84 Fig.5-3 座屈例 1
- p.84 Fig.5-4 座屈例 2
- p.84 Fig.6 凹損量と凹損の分布
- p.94 図 3 船首楼甲板ピラーの座屈
- p.94 図 4 船首楼ピラー、ガーダーの損傷
- p.95 図 5 ハッチビームの破損
- p.95 図 6 船尾楼前端壁の凹損
- p.95 図 7 船橋楼前端壁の凹損
- p.116 Fig.2 タンカーの船底ウェブの座屈

日本造船学会 構造委員会・関西地区部会では「バルクキャリアの構造強度に関する文献抄訳集」を編集しているが、その中から座屈損傷に関する文献を以下に紹介する。

(文献) バルクキャリアの構造強度に関する文献抄訳集, 平成 4 年 10 月, 日本造船学会, 構造委員会・関西地区部会

- CROSS DECK 損傷例, 関西 70 7 1/1, 三井玉野
- 32 型 B/C の衝突による損傷, 西部 129 30 1/1, S58.11, 三井玉野
- 進水時損傷について, 西部 104-15-3/3, 三菱長崎
- 船体構造のメンテナンス・フリーに関する研究, SR-200-7, '80.3, 造研
- 60BC のバラスト時のタンク強度, 西部 124-2-1/2, '82.9, 日立広島
- バラ積貨物船の満載時における遭難事故解析, 造論, 154 号, S59.12, 山本他
- TOP SIDE TANK 内 WEB の座屈損傷, 関西 153-83-12/6, '83.12, 石播相生
- 33 B/C TOP SIDE TANK の損傷, 西部 130-1/1, '84.3, 三菱下関
- ばら積貨物船の損傷, 日本海事協会誌, No.191, 1985.II, 池田他
- 各国船級協会の直接強度計算法並びに座屈強度計算基準について, S60.10, RK 委
- 鉾石運搬船の CROSS DK. の損傷解析, 関東 88-4(149 回), 三井本社
- BULK CARRIER の BILGE HOPPER TRANS.WEB の損傷例, 関西 89-10-4, 川重設計

2.2.6 参考文献

以下には、座屈損傷についての知識を得るために有用であると思われる文献の一覧をのせる。

- 村井謙二: コンテナ貨物船の船首船側外板の損傷、日本海事協会会誌、No.150 (1975)
- 船級管理部: 自動車運搬船(PCC)の損傷及び対策(その1, 損傷の概略)、日本海事協会会誌、No.161 (1977)
- 船級管理部: 自動車運搬船(PCC)の損傷及び対策(その2)、日本海事協会会誌、No.162 (1977)
- 船級管理部: 木材チップ運搬船の損傷、日本海事協会会誌、No.166 (1979)
- 阿部三雄: NK 船級船の損傷と対策、日本海事協会会誌、No.175 (1981)
- 西村充男: 貨物倉内横肋骨の損傷とその保守管理、日本海事協会会誌、No.179 (1982)
- 池田均: NK の損傷情報システムと船体損傷、日本海事協会会誌、No.181 (1982)
- 池田均ほか: ばら積貨物船の損傷、日本海事協会会誌、No.191 (1985)
- 大八木正広: 過去の経験から何を学ぶか、日本海事協会会誌、No.202 (1988)
- 安田健二ほか: 上甲板及び外板のき裂損傷について、日本海事協会会誌、No.206 (1989)
- 今井史彦: 船体損傷の典型的事例とその対策、日本海事協会会誌、No.210 (1990)
- 石川一郎: 高温環境下の腐食(船体)、日本海事協会会誌、No.218 (1992)
- 高張力鋼構造検討会: VLCC 船側縦通材の損傷について(高張力鋼構造検討会報告から)、日本海事協会会誌、No.218 (1992)
- 検査技術部: 高齢大型ばら積貨物船に関する調査—高齢大型ばら積貨物船調査会報告から—、日本海事協会会誌、No.219 (1992)
- 水上知夫、石川一郎: 最近の船体損傷の傾向と対策、日本海事協会会誌、No.227 (1994) (II)
- 日本造船学会誌 787 1995/1 特集: 損傷に学ぶ

- 大坪: 「野島崎沖における損傷」、船舶、海洋構造物の損傷に関するシンポジウム (日本造船学会主催) 昭和 58 年
- 秋田: 「船舶・海洋構造物の構造損傷概論」、船舶、海洋構造物の損傷に関するシンポジウム (日本造船学会主催) 昭和 58 年
- 船体の損傷とその対策に関するシンポジウム S46.10 日本造船学会
- 船のメンテナンス技術、船のメンテナンス研究会編著、成山堂
- 日本海事協会 技術研究所: VLCC 船側縦通材の損傷について—高張力鋼構造検討会—研究発表会前刷 (1991)
- 西部造船会: 波浪による船首外板の損傷とその対策、技術研究会構造部会資料 (1987)
- 日本海事協会: 水深タンクの損傷研究会報告 (1969)
- 日本造船学会: 船体の損傷とその対策に関するシンポジウム (1971)
- 鈴木宏: 撒積貨物船の構造上の問題点, 造船学会誌 484 号, (昭和 44 年 10 月)

3. 損傷情報システム構築に向けて — 船体損傷情報システムの考え方 —

- 3. 1 経年船の構造健全性
- 3. 2 船体損傷情報システムに関する研究

3. 1 経年船の構造健全性

横浜国立大学工学部 角 洋一

1. 序論－船体の経年変化－

経年船問題については、造船学会誌^{1、2、3})や本シンポジウム^{4、5})において緊急の国際的政策課題として取り上げられ熱い議論が交されているが、本論ではこの問題について技術的側面からの理解を現状の知識をベースに深めてみたい。

一口に経年船と言っても、メンテナンスが良好で新造時とほとんど変わらぬ船体強度を有する船から、構造部材に腐食衰耗が進行した船、あるいは腐食とともに疲労き裂が発生した船、船体主要部に大規模破壊を生じる直前の船まであり、それらの強度劣化の程度とその要因は非常に多種多様である。多様性こそ経年船の特質であり、特に強度を数値化する際に考慮しなければならないのは、図1に示すように経年劣化による強度パラメータの平均値の低下もさることながら、むしろその分散の増大である。検査や点検の質・量なども含めこのバラツキの増大が経年船に発生する予期せぬ大規模損傷の原因と理解すべきである。逆に言えば、経年船の強度を的確に評価するには、個船の現況の把握が極めて重要であり、本船の現在の状態が図1に示される経年船全体としては大きくバラついた分布の(平均値として)どのあたりに位置し、想定すべき分散は個船としてどの程度かを判断することのできる情報が常に必要なわけである。

現状の個船の検査・点検では、板厚測定については平均値的評価が、またき裂については(発見し易い場所で)発見されたものについてのみ評価されるが、これらの分布についての情報も含めた総合的な現況評価が、今後より一層重視されることになるであろう。

1. 1 経年変化の要因

船体構造の経年変化の主な要因が腐食と疲労であることは論を待たない^{6、7})。日本海事協会の統計資料によると、設計・工作に起因するき裂を中心とした損傷が船齢5年程度をピークに減少し始めるのに対して、腐食衰耗による損

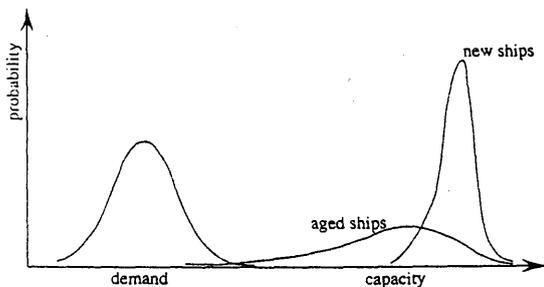


図1 経年船の強度の概念図

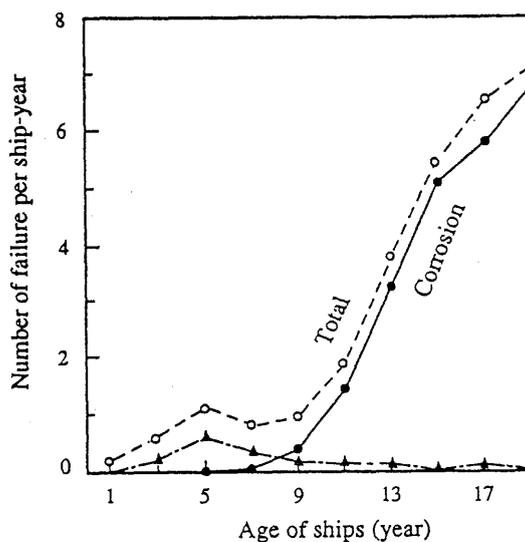


図2 船齢別の損傷原因の割合

傷は船齢10年を過ぎると逆に急増し、図2に示すように損傷原因の大部分を占めるようになる⁸⁾。腐食が進行すると、局部的応力上昇により疲労き裂が発生・進展することもあり、外板・甲板の大規模破壊などの重大損傷に繋がる危険性が増す。船体構造の健全性を維持するためには腐食衰耗による強度低下を防止することが極めて重要である。

疲労による経年船の損傷はVLC Cにおいて顕著であるといわれているが、図3はこのことを裏付けている。腐食による損傷とともに船齢15年を過ぎると疲労き裂損傷が増加することがわかる。このような経年船の疲労き裂損傷は前述のように腐食衰耗と重畳して現われることが多く、他の船種においても必ずしも経年船の疲労損傷が少ないわけではない。

1. 2 経年船の構造健全性

経年船の構造健全性を維持するには、前述の腐食衰耗した構造および発見されたき裂を有する構造の残余強度の推定評価を基礎に、メンテナンス計画に基づきその後の検査・点検・補修を行う必要がある。

船体強度の基本である縦強度については、現状では板厚計測を行い推定された船体の断面係数を基礎に強度判定が行われるが、最近の計算力学の進歩により弾塑性解析による船体はりの最終強度を基礎とした判定も可能となっておりこれらの関係を明らかにしておく必要がある。後述するように腐食衰耗した板の変形能は低下することが知られており、強度とともに変形能の評価をどのように位置付けるかについて縦強度、横強度、局部強度などのそれぞれの構造強度特性の相違を考慮した上で、十分理解を深める必要がある。変形能の問題は、当該構造が破壊するまでに吸収するエネルギーに直接関係するので、サブスタンダード船の大

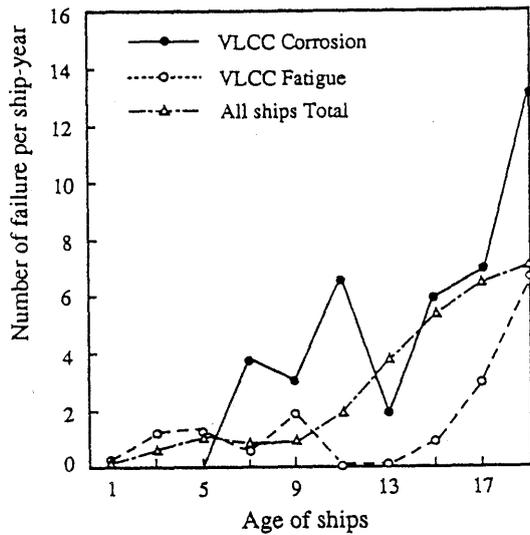


図3 大型タンカーの船齢別の損傷原因

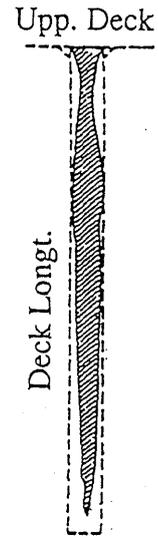


図4 油タンカー（28、600 dwt、船齢15年）のデッキロンジの腐食衰耗の例

規模損傷で問題となった船側構造の脱落や船首部外板の脱落、座礁・衝突時の船底・船側構造の破壊挙動との関係で局部強度・横強度を評価する場合に特に注目すべき観点である。

疲労き裂については、設計・工作に起因する就航初期のき裂発生は極力避けねばならないが、一方一船毎に詳細構造が微妙に異なる船体構造の場合、構造設計に十分な時間をかけて航空機などと同様な詳細な疲労設計を適用することが困難なのも事実である。また、売船を経て船主が変わると、設計時に想定しなかった使用形態が生じることも考えられる。したがって、検査・点検とモニタリングにより適切な維持管理をするとともに、今後の新船設計にこれらの結果を反映させていくのが、現実的な対応である。

2. 腐食

2.1 腐食現象

船体構造の腐食現象について、補強板構造の強度を支配する骨材および骨材と板の隅肉溶接の腐食、板材の一般腐食、局部腐食の順に考察し、腐食速度推定に関わる各種要因について考察する。

(1) 骨材の腐食

船体構造部材の中で骨材は、基本的に両面腐食をうける部材であり、またウェブはフランジに比べ板厚が薄いので腐食の影響を受けやすい部位である。図4に油タンカー（28、600 dwt、船齢15年）のデッキロンジの腐食衰耗の例を

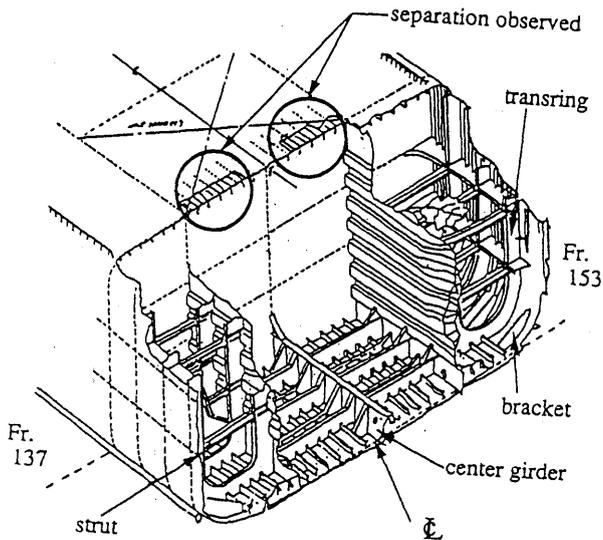


図5 ナホトカ号の船尾部の破断状況
と甲板とロンジの剥離

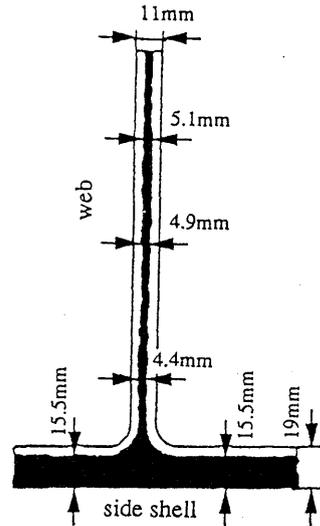


図6 老朽化した大型ばら積船の船側
肋骨の衰耗

示す⁸⁾。バラスタックおよび荷油／バラスタック兼用タンクの甲板およびデッキロンジが腐食衰耗して、隅肉溶接が無くなり、ロンジが甲板から脱落する場合もある。これは、バラスタ海水の影響と甲板裏が高温多湿であることによる影響が大きいと推察される。衰耗したデッキロンジの断面形状を見ると隅肉溶接はすべて消滅し、ロンジ先端はナイフエッジ状である。ナホトカ号の船尾部調査でも図5に示すように甲板とロンジの剥離が多数観察されている^{9 10)}。

同様な骨材の衰耗は大型ばら積船の船側肋骨にも見られる。これは、現在大問題となっている老朽化したばら積船の大規模損傷の第1次原因となった損傷である。腐食衰耗状況の一例を図6に示すが、この例ではウェブの板厚が半分になったと報告されている。ばら積船の場合積荷の石炭に含まれる硫黄成分が船側外板等の結露に溶け込み硫酸腐食を引き起こすといわれている。

船側縦通肋骨のような水平部材では、ウェブ上面が汚損し易いため、腐食衰耗が早いという報告もある。

(2) 板材の一般腐食

無塗装材の場合、板表面の腐食は、初期には腐食ピットがランダムに発生し、それが順次合体して進行すると考えられる。したがって、腐食面は一様な板厚減少をするのではなく、不規則な凹凸を持った表面を形成する。腐食の程度は後述するように一般に平均的な腐食速度で論じられることが多いが、強度評価の観点からの表面形状の不規則性の影響について現在のところ知見は多くないが^{11、12)}、後述するように重要な評価項目であると考えられる。

また最近の問題として、2重船殻構造タンカーの運航者からの報告に、原油中の微生物によるピッチング腐食（Microbially Induced Corrosion, MIC）¹³）があり、微生物により生成される硫化水素（ H_2S ）にその原因があると言われていたが、この種の原油の性状とその対策は今後の調査に待たれる。

（3）局部腐食

局部腐食として、孔食（ピッチング）、応力集中部の腐食、溶接線に沿ったグルーピングが知られている。

孔食（ピッチング）

油タンカーの荷油倉の無塗装鋼板は一般に堅い黒錆に保護されているが、この黒錆が機械的影響により剥離し易い洗浄機の直下などでは、この剥離部に電食による孔食が発生する場合があります。一般腐食より極端に早い2～3mm/年という事例も報告されている。塗装なども含め、このように、鋼板面の腐食に対する保護膜が局部的に剥離する場合は腐食電流密度を著しく高めるので、この種の可能性に対しては電気防食などの対策をとるべきである。

応力集中部

応力集中部は高応力による鋼板のひずみにより、保護膜としての錆が剥離し、現われた鋼板面が再び錆びるといった繰り返しにより急速に腐食が進展するものである。このような局部腐食には塗装不良による塗膜劣化によるものも多い。高張力鋼を用いると当然作用応力レベルが上昇するので、この種の腐食の可能性が増すので溶接止端部の形状と塗装には十分注意すべきである。

応力集中とは異なるが、変形が関係する腐食としては、高張力船体の作用応力レベルの上昇に伴うたわみの増大による腐食進行の加速に対する懸念が表明されており、今後の調査研究を要する。

グルーピング

鋼板と溶接金属の電位差によって図7に示す溝状の腐食が発生することがある。また、スチフナなどの小骨では、先の図4に見られるような選択的腐食（ネッキング）が生じることがある。腐食電流密度の局部的増大と、衰耗による応力上昇などいくつかの要因が複合し、局部的ではあるが極めて早い腐食衰耗を引き起こす可能性があることに注意すべきである。

以上代表的な局部腐食について述べたが、これらは適切な電気防食を施すことによって防ぐことができるものが多いが、実際の電気防食に際し、防食管理計画が不十分なためその効果を十分発揮していない事例が、非常に多いと言われている⁸）。

（4）腐食速度の定量化と影響要因

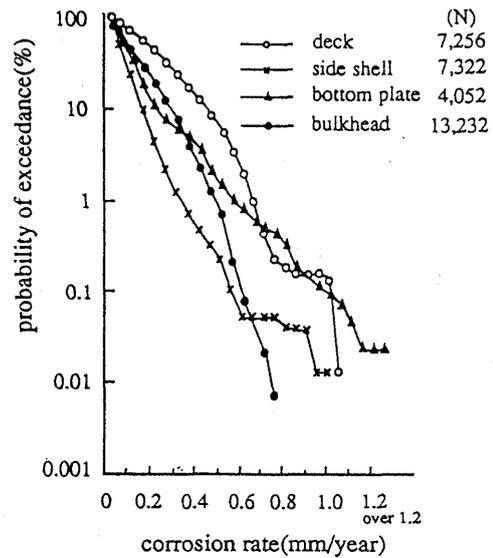
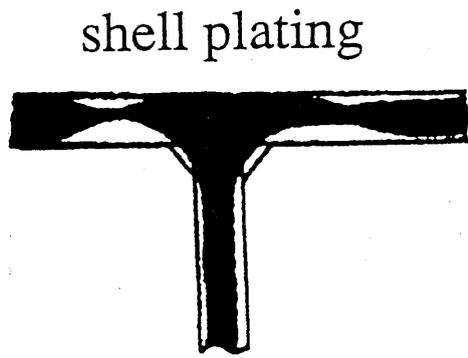


図7 隅肉溶接のグルーピング腐食

図8 タンカーの部材別の腐食速度の超過確率

表1 船種別の腐食速度調査結果

| | N | $\overline{\Delta t_m}$ | σ_m | $\overline{\Delta t_{max}}$ | σ_{max} | Q_m | | Q_{max} | |
|----------------|-----|-------------------------|------------|-----------------------------|----------------|-------|------|-----------|------|
| | | | | | | 50% | 10% | 50% | 10% |
| all ships | 519 | 0.10 | 0.08 | 0.34 | 0.23 | 0.10 | 0.25 | 0.32 | 0.61 |
| tanker | 89 | 0.10 | 0.08 | 0.40 | 0.21 | 0.11 | 0.22 | 0.39 | 0.63 |
| ore carrier | 27 | 0.12 | 0.08 | 0.46 | 0.18 | 0.14 | 0.27 | 0.50 | 0.76 |
| bulk carrier | 17 | 0.17 | 0.07 | 0.49 | 0.20 | 0.21 | 0.27 | 0.45 | 0.84 |
| general cargo | 216 | 0.09 | 0.06 | 0.29 | 0.15 | 0.10 | 0.20 | 0.28 | 0.48 |
| lumber carrier | 37 | 0.20 | 0.11 | 0.55 | 0.47 | 0.23 | 0.37 | 0.48 | 0.90 |

N. B. ; N: numbers, $\overline{\Delta t_m}$: mean of mean corrosion rates(per year), σ_m : standard deviation of mean corrosion rates,

$\overline{\Delta t_{max}}$: mean of maximum corrosion rates, σ_{max} : standard deviation of maximum corrosion rates,

Q_m : probability of exceedance of mean corrosion rate, Q_{max} : probability of exceedance of maximum corrosion rate

図8 にタンカーの部材別の腐食速度の超過確率、また表1 に腐食速度を船種毎に調査した結果を示すが、序論で述べた経年船の特徴であるバラツキの大きさというものが実感されるであろう。これらのバラツキは設計、防食仕様、貨物性状、構造の部位、運航、保守の諸条件が複合して現われるわけだが、現状ではこれらの要因の腐食進行に対する定量的分析はできていない。

塗装された部材の腐食衰耗は塗膜の保護機能が劣化してから生じるので、腐食衰耗発生までの期間と腐食衰耗開始以後の期間を分けた調査が最近行われるようになった。ばら積船の肋骨下端の調査結果を表2 に示すが、これによると腐食衰

表 2 ばら積船の肋骨下端の腐食衰耗開始後の腐食速度

| Type of Paint | No. of points | initiation life α (years) | | progress rate β (mm / year) | |
|---------------------------|---------------|-------------------------------------|---------|--------------------------------------|---------|
| | | Mean | S. Dev. | Mean | S. Dev. |
| Oily paint | 40 (5) | 7.71 | 3.22 | 0.570 | 0.260 |
| Tar-epoxy paint | 17 (5) | 8.61 | 2.32 | 0.239 | 0.233 |
| Metamorphosed epoxy paint | 14 (1) | 7.20 | 0.77 | 0.971 | 0.229 |
| Nil | 3 (1) | 2.18 | 1.68 | 0.647 | 0.270 |

() indicates the number of ships

表 3 ナホトカ号の主要構造部材の腐食による板厚衰耗の状況

| Member /Location | P/S | Numbers measured | Wear(mm) | | |
|-----------------------------|-----|------------------|----------|-----|-----|
| | | | Average | Max | Min |
| Bottom Shell | | | | | |
| Fr. 153-169 | P | 18 | 3.0 | 6.4 | 1.0 |
| | S | 18 | 2.5 | 5.3 | 1.2 |
| Fr. 137-153 | P | 18 | 2.3 | 3.4 | 0.9 |
| | S | 18 | 2.9 | 4.2 | 1.7 |
| Side Shell | | | | | |
| Fr. 153-169 | P | 12 | 4.5 | 6.9 | 3.2 |
| | S | 12 | 4.7 | 6.7 | 2.9 |
| Fr. 137-153 | P | 1 | 5.8 | - | - |
| | S | 1 | 6.2 | - | - |
| Deck Plate (Center Tank) | | | | | |
| Fr. 153-169 | P | 9 | 2.8 | 3.4 | 2.2 |
| | S | 9 | 4.0 | 4.6 | 2.8 |
| Fr. 137-153 | P | 9 | 2.7 | 3.6 | 2.2 |
| | S | 6 | 3.2 | 3.3 | 2.7 |
| Deck Plate (Side Tanks) | | | | | |
| Fr. 153-169 | P | 12 | 6.3 | 7.2 | 3.8 |
| | S | 12 | 7.1 | 7.7 | 6.1 |
| Fr. 137-153 | P | 12 | 5.9 | 6.8 | 5.4 |
| | S | 12 | 6.5 | 7.6 | 5.8 |
| Deck longitudinal | | | | | |
| Fr. 153-169 | P | 6 | 3.3 | 4.3 | 2.5 |
| | S | 6 | 3.4 | 4.4 | 2.7 |
| Fr. 137-153 | P | 6 | 1.8 | 2.5 | 1.0 |
| | S | 6 | 2.2 | 3.3 | 1.1 |
| Structural members in Tanks | | | | | |
| | P | 225 | 2.1 | 4.6 | 0.2 |
| | S | 298 | 2.1 | 4.5 | 0.2 |

耗開始後の腐食速度は表 1 に示す従来の統計値に比べ著しく増加することが分かる。

上述のように腐食衰耗に対する影響要因は定性的理解に止まっている。積載貨物としては石炭中の硫黄分による希硫酸の生成、原油中の硫化水素などが、腐食衰耗を促進するといわれている。

腐食現象は化学反応であるから高温の部位でその進行が促進される。甲板への日光の直射と高温多湿なスプラッシュ・ゾーンとなる海水バラストタンクの上甲板下面における腐食衰耗の厳しさは良く知られている。表 3 に昨年日本海で折損沈没したロシア船籍タンカー「ナホトカ号」の調査結果を示すが、荷油／バラスト兼用タンクの上甲板において顕著な腐食衰耗が計測されている⁹⁾。

また、近年の燃料粗悪化に伴い燃料の加熱温度が高くなったことにより燃料タンクに隣接するバラストタンクにも著しい腐食衰耗が生じることがある。

2. 2 腐食への対応

腐食に対する技術的対応は、塗装、電気防食に代表される防食技術、鋼板の腐食代の設計時における合理的取扱い、さらに腐食進行を的確に把握する検査と検査で過度な腐食衰耗が発見された場合の鋼板新替を含む補修に分けて考えることが出来る。以下では、海水腐食が重要なバラストタンクの問題を中心に考察する。

(1) 防食

塗装

従来、塗装については船主の自主的判断に委ねられていたが、経年船問題の重要性に鑑み 1990 年代に入ってようやく塗装に関する義務付けが国際条約や船級規則に取り入れられるようになった。例えば、1993 年に発効した Enhanced Hull Survey では、タンクの塗装状態について検査と評価の記録が義務づけられている。

塗膜が有効に鋼板を保護している間は、鋼板腐食を生じないと考えて良いので、塗装鋼板の場合塗膜の劣化の評価が極めて重要となる。日本海事協会 (NK) のバラストタンク調査によると、漲水率 50% 程度の常温没水部のタールエポキシ (TE) 塗装の薄錆発生までの寿命が図 9 のように整理されている。これから、一般の没水部の塗膜寿命は 1 回塗の標準膜厚 200 μm で約 20 年、250 μm で 30 年程度となることがわかる。

一方、高温部なども含む漲水率 50% の一般仕様のバラストタンク全体の NK による塗装状態調査結果を図 10 に示す。縦軸の塗膜状態のグレーディングは cA から cE へとその劣化の程度が大きくなるが、その詳細は文献 [8] を参照されたい。何れにしても、塗膜の寿命は 7~15 年程度とかなり短くかつ大きくば

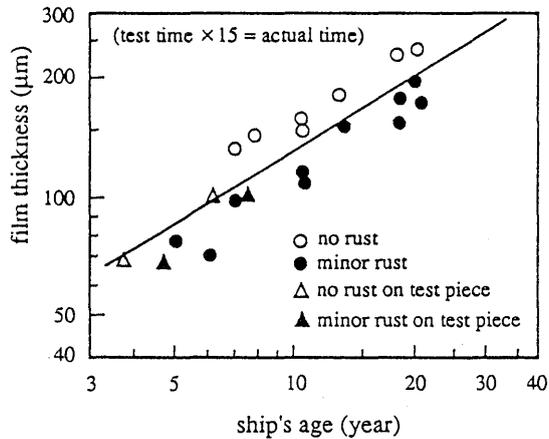


図9 タールエポキシ (TE) 塗装の薄錆発生までの寿命

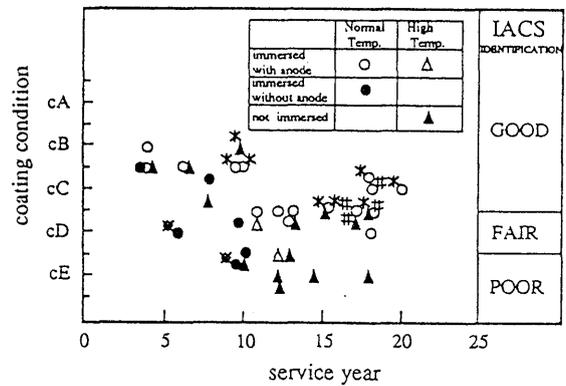


図10 一般仕様のバラストタンクのNKによる塗装状態調査結果

らついている。このバラツキの要因には塗装部における環境要因と塗装の品質要因に大別できる。環境要因としては、高温非没水部（甲板裏など）や応力集中部における塗膜の早期劣化がある。品質要因としては、材質の不適合、施工時の下地処理の不良、膜厚不足や不均一などがあり、特に溶接部やフリーエッジ部など塗装施工のしにくい部分に塗装不良が生じやすい。これらの要因が重畳して、実船において図10のような大きな塗膜寿命のバラツキが生じているわけであり、環境に応じた塗装仕様および構造部位に応じた塗装施工の技術標準の確立が求められている。

電気防食

没水部の防食法として電気防食が古くから行われているが、NKの調査によると電気防食が設置されているにもかかわらず防食効果を示していない例が非常に多い。これは、使用する環境（温度、作用応力のレベル）に応じた適切な防食仕様が満足されていないことと陽極の適切なメンテナンスが出来ていないことに起因している。適切な電気防食は塗装と組み合わせることにより、特に前述の没水部の局部腐食を防ぐのに有効である。

適切な防食設計のための技術開発とともに現状の技術水準では設計の段階で適切な電気防食仕様が明確に指定できないということであれば、就航後の検査結果をその後の防食管理計画に反映させるシステムを確立することが現実的対応である。

新しい防食技術

大型海洋構造物の長期耐用技術に関連して、腐食の激しい浮体側部のスプラッシュゾーンに耐海水腐食性の良い新素材チタンラッド鋼を取り付けることが計画されている¹⁴⁾。経済性についての制約からこの技術がそのまま船体構造に適用できるとは思えないが、ライフサイクルコストとの関係で経済性の高い耐食性鋼板の開発とその船体構造への適用法の研究開発には関心が持たれる。

船舶のバラスタンク内の防食法に関して、塗装に代わる防食法としてバラスタンクに窒素ガスを封入し、酸化を抑止するシステムの開発がS & O財団で進められている。この研究では、実船レベルにおける高純度窒素ガスの供給・置換・維持をシステム化した船舶バラスタンクの開発を行っている¹⁵⁾。

(2) 腐食余裕代

前述のように実際の船体構造では防食の効果は限定的であり、ある程度の腐食衰耗は避けられない。腐食した船体構造が必要な強度を維持するために船級規則では板厚に腐食余裕代が導入されている。NK規則の腐食余裕代は2.5mmあるいは3.5mmであり、さらに深水タンク頂版やばら積船の内底板など過大な腐食や損耗が予想される部分には1mmの増厚が要求されている。

これらの腐食余裕代は図8や表1のデータから得られる平均的な腐食衰耗に対して船体の寿命を20年程度とした場合に対応する値であるが、船体の腐食衰耗には前述のようにバラツキが大きいので、船齢の増大とともに検査・点検により過度な衰耗が発見された場合には構造部材の新替えが必要となる。腐食代は腐食に対するメンテナンスフリーを目的としたものではなく、標準的な船舶の使用条件のもとで腐食衰耗による新替えが、経済的に許容範囲に収まるように定められたものであると解釈すべきである。

船体強度を維持するための板の新替えは、局部強度からの要求で決まることが多いが、縦強度については実測された断面係数が静水中曲げモーメントと波浪中曲げモーメントに基づき定められた国際船級協会連合(IACS)の基準値を上回るという条件で判断される。ナホトカ号の甲板新替え部分の事例を図11に示すが、どの範囲を新替えするか、また建造時の板厚に復帰させるか否かについての合理的な基準が必要である。

横強度部材や局部強度部材についてはどの範囲をどのように新替えするかの基準は、船級協会の内部資料とされ公開されているものは少ない。合理的な新替えの技術基準を設けるには、腐食余裕代を除いたネットシップでの強度判定が必要であり、今後、新船も経年船も含め強度判定の考え方がこの方向に収束することを期待したい。

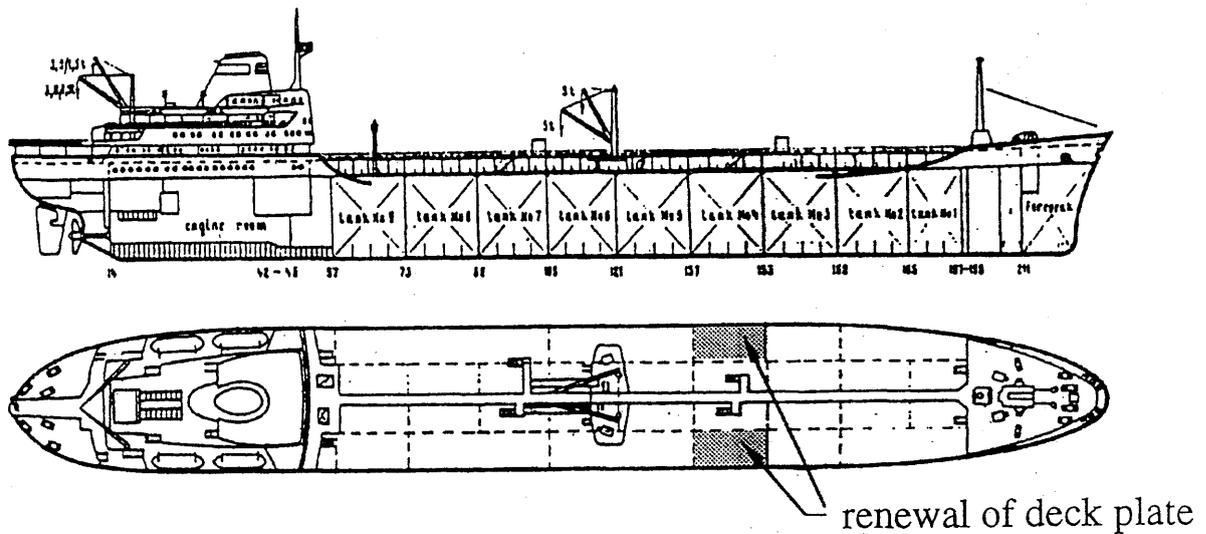


図 1.1 ナホトカ号の甲板新替えの状況

(3) 計画的検査と保船

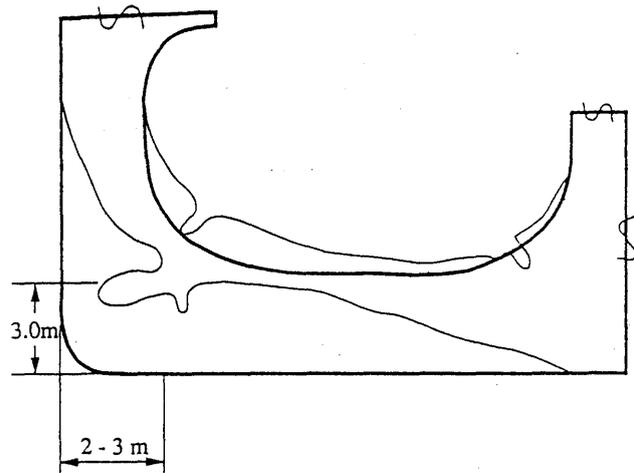
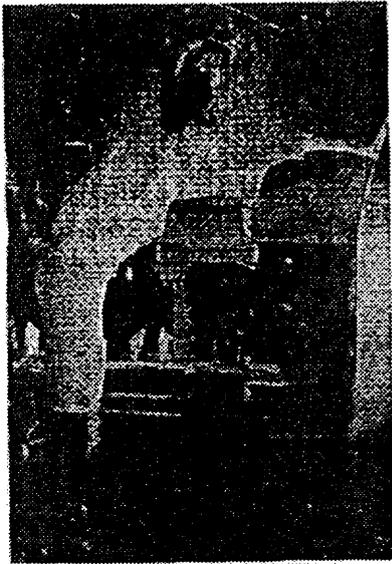
経年船の腐食衰耗を適切に管理するためには5～10年程度経過した段階での塗膜の検査、板厚測定が必要である。検査の方法は、現状では目視と超音波板厚計測であるが、検査そのものの精度にバラツキが大きいことが問題である。この原因は、現状では船体構造そのものが必ずしも検査しやすい構造になっていないことも含め検査を行う環境が十分には整備されていないことによる。計画的メンテナンスのための検査スケジュールや検査履歴のデータベース化、船体構造そのものを重要部位に接近して検査し易い仕様・構造とすること、検査を行う人間にとって便利な携帯検査支援機器を研究開発することなどが必要である。

3. 腐食した船体の降伏強度

3.1 腐食鋼板の強度特性

大規模破壊を生じた老朽船の破壊状況を巨視的に見ると、十分塑性変形を生じず延性に欠けた破壊をしているように見えることが多い。図1.2 aは波浪により船首部外板を脱落した損傷例である⁶⁾。一方、座礁により過大荷重を受けた比較的新しい船の船底の損傷状態の概念図を図1.2 bに示すが、これらを比較してみるとその巨視的変形能の差が大きいことがわかる。これらの差異は、経年船の腐食および疲労き裂の存在などが関係すると推察されるが、本節では腐食材の強度について考察する。

材料強度に及ぼす腐食の影響は腐食層近傍の金属組織に及ぼす化学変化と、もう一つは表面に形成される凹凸などの幾何学的不整である。岡らによれば、軟鋼の場合、海水環境下では特にぜい化が起きる化学反応は無いとされており、また



(a) 経年船の船首部外板の脱落 (b) 新船の船底座礁損傷時の変形

図 1 2 大規模損傷を生じた船体の損傷状況の事例

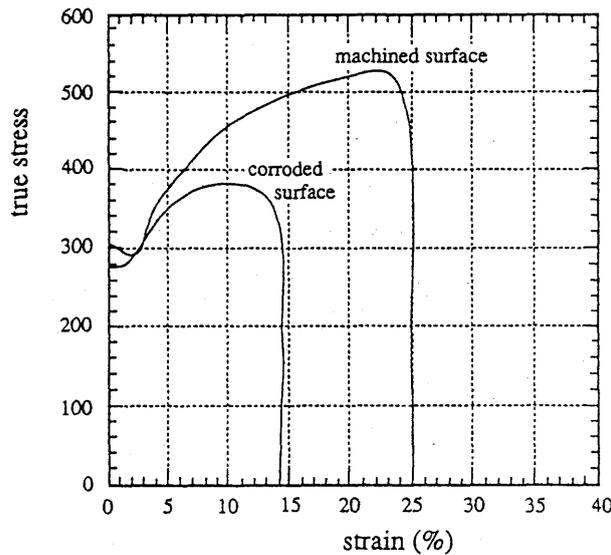


図 1 3 ナホトカ号から採取した材料の引張試験結果

腐食層近傍の材料組織を観察しても母材と特に変化した組織は見られないことが知られている¹⁶⁾。したがって、通常の海水環境下では、素材としての靱性劣化は無いと考えてよい。強度についても、腐食材から研磨した標準試験片を作成し、引張試験を行うと十分な強度と延性を示すことが知られている。図 1 3 にナホトカ号から採取した材料の引張試験結果を示す。機械加工した素材の強度・延性に比べ、腐食した凹凸面をそのままに残した試験片は降伏強度はほぼ同一レベルにあるもののその後の強度と破断時の伸びが大幅に低下している。したがって、腐食材の延性の劣化は表面不整による幾何学的影響として理解すべきである。

降伏強度については全断面降伏までの挙動はおおよそ断面の平均板厚を有する

平滑材と同様となるが、これは弾塑性状態での弾性域への応力再配分の影響によると理解される。一方、全断面降伏後は表面曲率の大きい凹部で変形の局所化が進行し、巨視的延性の欠如した挙動を呈することになる。なお、表面不整や片面腐食の影響は局部的応力集中の影響と同時に作用応力の偏心によって当該部に二次的曲げ応力を誘起することに注意すべきである。

図13に示した腐食材の応力-ひずみ関係は試験片の寸法にも依存するであろう。なぜなら、表面形状不整は確率分布しているので、大きな試験片ほど大きな腐食による凹部を含む確率が高いからである。腐食した平板の応力-ひずみ関係についての研究^{12、13})は現状では十分でない。腐食衰耗した実船の破壊挙動のシミュレーションを精度良く行うには、統計的性質を十分反映した平板の応力-ひずみ関係が必要になると思われる。

3.2 腐食した船体の強度

本節では腐食した船体の強度のうち、ばら積船船側肋骨の強度と上甲板の座屈・塑性崩壊強度について述べる。

(1) 腐食による応力分布の変化

腐食による応力分布の変化は、腐食衰耗量が初期板厚に比例して衰耗するとすれば理論的には板厚に逆比例して増加する。第一義的な腐食による応力増加はこの板厚変化をベースに考えればよいが、実際には各部材の板厚も腐食衰耗の程度も異なるのでこの条件は満たされない。構造不静定による応力再配分により腐食後の構造内応力分布は複雑に変化する場合があることに注意すべきである。

(2) ばら積船船側肋骨の強度

ばら積船船側肋骨の腐食の影響および1993年のIACSによる腐食対策補強について村上⁶⁾が検討した結果を示す。比較は下記4ケースである。

ケースa：IACS要求前の標準的板厚

ケースb：ケースaの腐食後

ケースc：IACS要求の増厚をした標準的板厚

ケースd：ケースcの腐食後

初期板厚および腐食量は表4に示すものを想定した。解析モデルは横強度検討用の1/2+1/2船倉モデルであり、積付条件は鉄鉱石の隔倉積み、外圧としては満載喫水に波の山の水頭を付加した条件を与えた。倉内肋骨下端位置の応力計算位置を図14に、また計算結果を表5に示す。計算結果はケースaに対する倍率で示されている。

この結果を見ると、IACS要求の増厚をする前のばら積船の船側肋骨が腐食した場合、その応力レベルは新造時に比べ30～50%増になっている。これは、

表 4 ばら積船船側肋骨の初期板厚および腐食量

| | location A | | location B | | shell plate |
|----------------------------------|------------|----------|------------|----------|-------------|
| | web | face | web | face | |
| original | 11 | 150 x 15 | 10 | 150 x 15 | 16.5 |
| corroded | 6 | 150 x 10 | 5 | 150 x 10 | 13.5 |
| reinforced(IACS) | 15 | 150 x 15 | 13 | 150 x 15 | 16.5 |
| reinforced(IACS) and corroded | 10 | 150 x 10 | 8 | 150 x 10 | 13.5 |

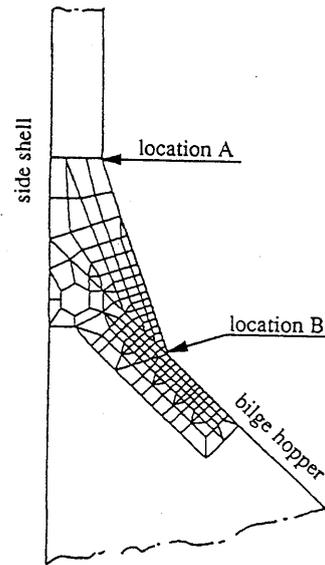


図 1 4 船倉内肋骨下端の応力計算位置

表 5 表 4 の各種状況におけるばら積船船側肋骨の応力

| | location A | | | location B | | |
|----------------------------------|------------------|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| | principal stress | shearing stress | equivalent stress | principal stress | shearing stress | equivalent stress |
| original | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| corroded | 1.45 | 1.50 | 1.41 | 1.31 | 1.29 | 1.30 |
| reinforced(IACS) | 0.89 | 0.91 | 0.87 | 0.81 | 0.81 | 0.81 |
| reinforced(IACS) and corroded | 1.20 | 1.17 | 1.18 | 0.87 | 0.87 | 0.87 |

明らかに腐食余裕代を超えており、このような状態を放置した場合には倉内肋骨下端部に疲労き裂が発生し、それが進展するとともに、過大荷重の作用により、肋骨と船側外板の隅肉溶接が剥離し、船側肋骨がビルジホッパー斜板や船側外板から剥離する可能性がある。

水圧を受ける補強板は小骨によって外板の受ける圧力を支持しているわけだから、小骨が比較的小さな外力で外板から剥離するということは、補強板としての外力に対する変形能が著しく低下することを意味する。先に述べた腐食平板の塑

性変形開始後の変形能の低下とともに、この小骨の外板からの剥離による構造的変形能の劣化は船体の局部強度に対する根本的な構造欠陥と言える。このような欠陥を有するメンテナンスの悪い経年船は、強度とともに吸収エネルギーも小さいので、荒天に遭遇すると外板に大破口などを容易に生じることになる。船側外板の大規模な脱落のメカニズムについてはき裂破壊の進行も含め第5章で検討する。

(3) 甲板の強度

パネルの腐食衰耗による座屈・塑性崩壊強度の低下を検討した矢尾⁶⁾の結果によれば、板厚衰耗が崩壊挙動に及ぼす影響は図15で与えられる。ここに、パネルの長さ a 、幅 b 、板厚 t 、腐食による一様な板厚減少 Δt 、降伏応力 σ_Y 、最終強度 σ_u である。また、細長比 ξ は

$$\xi = (b/t)(\sigma_Y/E)^{1/2} \quad (1)$$

と定義される。計算に用いらたアスペクト比は1半波部分のアスペクト比として最も低い圧壊強度を与える $a/b=0.8$ としてある。図から明らかなように腐食による最終強度の低下が最も大きい細長比が2程度の場合であっても、腐食衰耗が通常の腐食余裕代の範囲内に収まっていれば、最終強度の低下は10%以下と考えてよい。また補強材が板に強固に溶接されている限り、補強材ウェブの腐食衰耗による座屈・塑性崩壊強度への影響は無視できることが知られている。

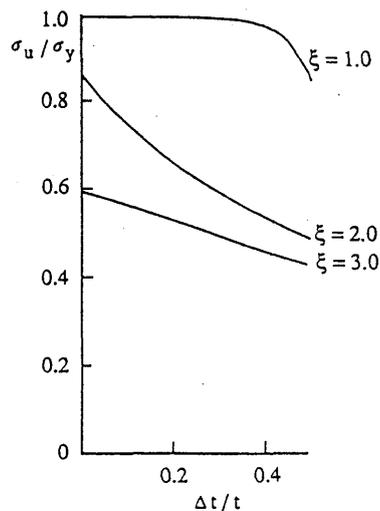


図15 板厚衰耗が崩壊挙動に及ぼす影響

座屈・塑性崩壊強度が懸念されるバラストタンクの上甲板パネルについて考えると、上述の結果から腐食衰耗が腐食余裕代の範囲内に収まり、かつ甲板縦通材に防撓機能がある限り甲板の崩壊につながるような危険は無いと考えてよい。腐食による隅肉溶接の有効脚長の減少と変形能の低下により甲板縦通材が甲板から

剥離しやすい状態になると、状況は一変する。甲板縦通材が甲板から剥離すれば有効な小骨の間隔が倍になると考えてよいのでパネルの座屈強度は一挙におおよそ1/4に低下する。このような状態が上甲板の腐食衰耗について構造的に本質的に危険な場合であり、船体折損などの大規模損傷に繋がる可能性が高いが、これについては、第5章で述べる。

4. 疲労設計と就航中に発見された疲労き裂への対応

近年、構造解析法の進歩に伴い船体構造の応力解析精度が向上し、座屈および塑性崩壊損傷は一部の老朽船を除き著しく減少した。また、高張力鋼の大幅採用による船殻の軽量化も進んだが、これに伴い、従来船体構造の強度限界として第一義的に重要であるとされてきた座屈強度と降伏強度に加え、疲労強度が新たに船体構造の強度限界として認識されるようになった¹⁷⁾。1990年代初頭に経験した疲労き裂損傷や大規模破壊を教訓に船体構造設計における疲労強度評価法の確立に向けた研究が現在進められている。最近の疲労き裂損傷の傾向についてはNKの資料^{18、19)}を参照することとし、本章では最新の疲労設計の概要と発見された疲労き裂の余寿命評価について解説する。

4.1 船体の疲労設計

(1) 疲労設計の概要

疲労の原因となる繰返し応力には、波浪・船体振動・ホイッピングなどが考えられるが、後の2つはそれぞれ防振設計と運航により対処すべき問題なので、ここでは、波浪変動荷重に対する疲労強度解析について述べる。

波浪中で船体が受ける繰返し荷重を推定するには、まず標準波高における規則波中の船体運動計算を行い、船体各部に作用する波浪変動圧、船体加速度による倉内貨物の慣性力による荷重、船体はりとしての断面力（縦曲げおよび水平曲げ）を定める。これは応答振幅オペレータ（Response Amplitude Operator, RAO）と呼ばれる。通常の船体運動および波浪荷重解析では、この応答関数を短期不規則海面（ISSCスペクトル等で表現される）に適用し、応答関数のスペクトルを定め、線形かつ狭帯域の仮定のもとに極値の頻度分布をレーリー分布として推定する。さらに、これを長期波浪統計に適用して各種荷重の長期分布を推定するというのが一般的に確立した手法である。ところで、疲労強度評価には当該部の応力の長期分布が必要であるから、前述の運動解析の考え方を直接的に拡張するとすれば、強度検討箇所の応力応答関数を定め長期予測する必要があるが、荷重ケースが膨大になるため応力範囲の長期分布を推定するための応力応答値計算について現在いくつかの便法が提案されている²⁰⁾。

疲労解析においては従来の船体構造解析には無かった極めて詳細な応力解析が要求される。全長300m以上の極めて複雑な溶接構造体の内部の数mmの範囲内の応力を高精度で計算する必要があり、その要求解像度は 10^{-5} のオーダーである。最新の構造解析技術にとっても極めて挑戦的課題といえる。疲労強度評価のための参照応力としてこのような部材溶接止端部のホットスポット応力を用いる方向にあるが、海洋構造物で確立されたこの手法も船体構造詳細に対しては現在実用化のための研究が進められている段階である。

作用応力範囲の長期分布は上述の運動解析と応力解析を組み合わせる求められるが、この頻度分布の形状を通常はワイブル分布で近似する。ワイブル分布の形状パラメータは解析結果と運航実績に基づき定める。これで、船舶の使用期間に対する作用応力の頻度分布が定まるから、基本溶接継手のS-N線図を用い、線形被害則を適用して疲労強度評価を行う。図16および図17に疲労解析の概略を示す。就航中に発見される疲労き裂の評価はき裂伝播寿命に基づき判定されるべきであり、この問題については次節で述べる。

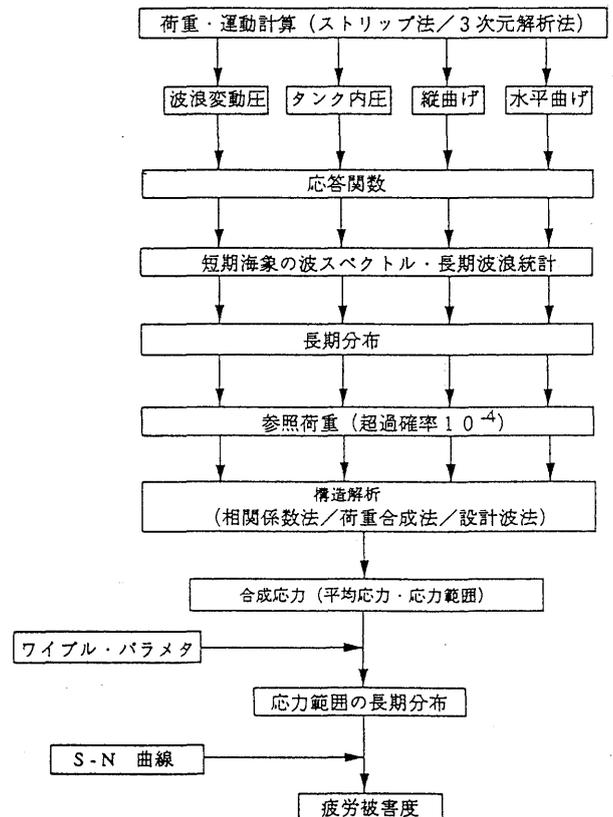
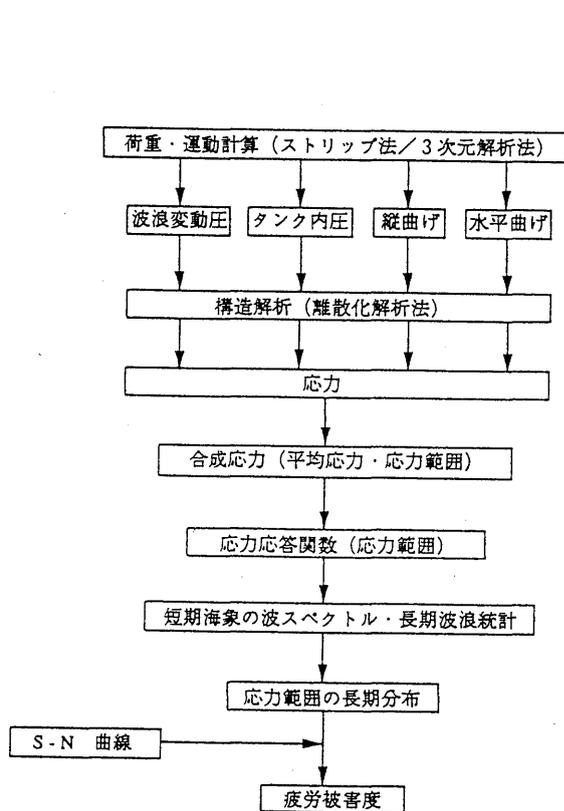


図16 応力応答関数による疲労解析法 図17 簡易疲労解析法

(2) 疲労強度に関係する荷重

静水中の荷重については満載状態とバラスト状態の2種を基本とし、それ以外の積付けを行う船舶については、その特定の積付けを考慮する必要がある。

船体が受ける変動圧力については、これを船体外部から受ける波浪変動圧力と船体内部の積み荷から受ける圧力に分けて考慮しなければならない。波浪変動圧を計算する手法としては、ストリップ法と3次元積分方程式法による計算があるが、現状の計算機環境では前者を用いるのが一般的である。これらの計算法はローリング運動に関する部分を除き、基本的に波高に関して線形であるから、波面の変動により没水/露出を繰り返す喫水線近傍船側構造の変動圧算定には工夫を要する。また、船体運動の上からはあまり問題にならない短波長波 ($\lambda/L < 0.3$) も考慮する必要があり、この場合散乱波による変動圧の正確な計算が必要である²¹⁾。

船倉内の変動圧力はその合力の作用線が貨物の質量中心を通りその大きさは当該船倉断面の船体加速度によって定まる慣性力に等しくなる線形分布で近似することが多い。ただし、加速度が大きくなって静圧との和が負圧になる場合にはその部分の圧力をゼロとするように分布を調整する。半載状態ではスロッシングが問題になるが、これについては別途考慮する必要がある。

上述の荷重のうち静的荷重は溶接残留応力とともに平均応力に影響を与え、動的荷重が変動応力を誘起する。疲労には、応力の変動範囲の頻度分布が第一義的に重要であり、これにはワイブル分布を仮定することが多い。疲労強度を検討する場合荷重とともに、部材の置かれた環境が重要である。即ち、空气中、海水中、その他腐食環境中等では同一材料であってもき裂発生寿命、き裂伝播寿命が共に大幅に異なる。使用条件を変更し、設計時には想定していなかった環境で使用する場合には上述の点に特に注意を払う必要がある。

疲労強度解析のための構造解析については各種の方法が提案されている。第1の方法は図16に示すもので、前述の船体運動計算に対応した構造解析を適当な規準波高に対して行い、各規則波に対する当該部1周期の応力変動を定め応力の応答関数を直接得る手法である。これを応力応答関数法という²²⁾。この方法は線形理論の枠組みを忠実に疲労強度解析に適用する方法であるが、構造解析の荷重ケースが多くなり、計算量が膨大になるという問題を含んでいる。

この困難を避けるために、いくつかの簡易解析手法が提案されている(図17)。その一つは、上述の解析結果をもとに、ある超過確率 (10^{-4} を取ることが多い) に対する当該断面に作用する圧力荷重による応力 σ_p と船体はりの曲げ応力成分 σ_B の相関係数 ρ_{pB} を定め、疲労強度検討箇所の作用応力 σ_T を

$$\sigma_T = (\sigma_P^2 + \sigma_B^2 + 2\rho_{PB}\sigma_P\sigma_B)^{0.5} \quad (2)$$

と合成する手法である。圧力荷重による応力 σ_P はさらに外圧による成分 σ_O と倉内荷重による成分 σ_I に分離され、それらの相関係数 ρ_{OI} を用い

$$\sigma_P = (\sigma_O^2 + \sigma_I^2 + 2\rho_{OI}\sigma_O\sigma_I)^{0.5} \quad (3)$$

と合成される。船体はり応力も垂直曲げ成分 σ_V 、水平曲げ成分 σ_H および相関係数 ρ_{VH} を用い、

$$\sigma_B = (\sigma_V^2 + \sigma_H^2 + 2\rho_{VH}\sigma_V\sigma_H)^{0.5} \quad (4)$$

と合成される。ここで、 σ_O 、 σ_I 、 σ_V 、 σ_H は船体運動応答解析の際得られる波浪変動圧力、倉内圧、縦曲げおよび水平曲げモーメントに対する当該部応力であるから、これらを求めておけば(2) - (4)式より直ちに合成応力が計算でき、計算が大幅に省力化される。この手法は相関係数法²³⁾と呼ばれている。

一方、船体に作用する変動荷重成分を規則波中の船体運動解析により定まる船体内外圧の変動荷重成分、船体はりに作用する曲げモーメント・せん断力の垂直および水平成分の3種に分離し、平水中における応力および変動応力が最大および最小になる状態における船体局部応力をそれぞれ独立に算定し、それらの荷重成分を適当に設定した比率で加算し合成応力を定める手法が提案されている。これをピーク時比率法(荷重合成法)²⁰⁾という。実際にはある位相差をもって作用する各荷重成分を便宜上それぞれ単独に計算し合成するので、本方法は船側縦通肋骨に対する波浪変動圧のように当該部の繰返し応力に支配的荷重成分がある場合には有効である。支配的荷重成分が超過確率 10^{-4} になる状態をまず定め、その状態において想定しうる最大の2次的荷重成分(例えば船側縦通肋骨に作用する船体はり応力)の割合を船体応答解析結果を基に定め、合成応力を算定する。この手法は、前述の相関係数による手法と類似の近似的手法であるが、圧力荷重の算定および応力の合成法に相違がある。

さらに簡便な手法として設計波法が提案されている²⁰⁾。この手法では、支配的荷重成分の応答が最も大きくなる波向きと波長を有する規則波について、波高として超過確率レベル 10^{-4} に対応する値を定め、この波による変動圧力による応力と船体はり応力を当該部に対して同時に計算する。このような考え方の合理性は船体応答のモニタリングにより検証できる可能性があり、今後の継続

的実船モニタリングによるデータの蓄積が望まれる。

(3) 階層的応力解析法と疲労強度評価

階層的応力解析

船体疲労設計における応力解析は、全長300m以上の構造体の数mm範囲の応力を精度良く推定することが要求されているが、このような解析を直接行うことは現状では不可能であるから、一般に全体構造解析、構造詳細解析、および溶接部詳細解析に分けた階層的解析手順が取られる。また各解析で得られる参照応力に対応して用いられるべき疲労強度のS-N線図、疲労破壊の定義も異なることに注意すべきである。

疲労強度には工作不整の影響が大きいことが知られているが、各解析レベルで考慮すべき不整量についても合理的な扱いが必要である。表6に疲労強度評価における階層的応力解析と各レベルの解析において得られる参照応力、考慮すべき不整量、S-N線図、疲労破壊の定義を整理した²⁴⁾。

表6 階層的応力解析と疲労強度評価

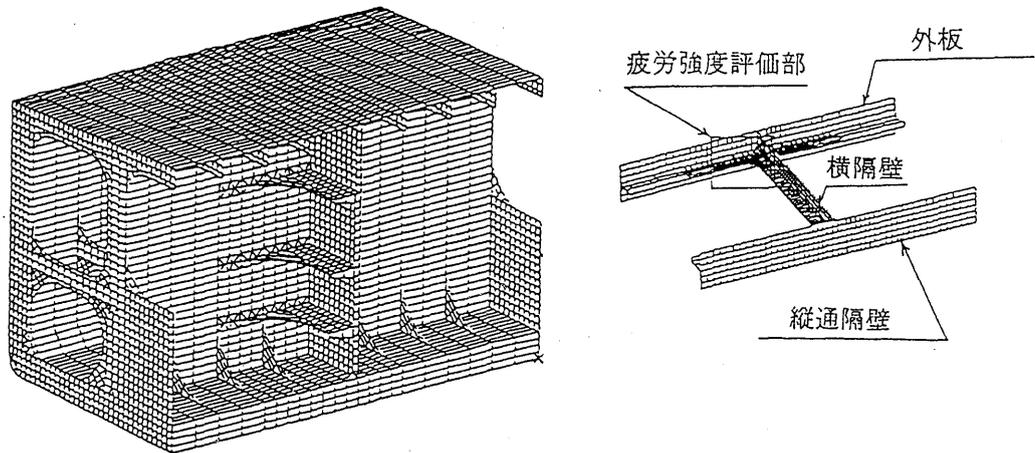
| 応力解析の階層分類 | 構造のモデル化 | 応力 | S-N線図 | 寿命 |
|-----------|--|-------------------------|---------------------------|----------------|
| 全体構造解析 | 構造の詳細は一部無視 | 部材応力 | 部分構造モデル | 部材破断 |
| 構造詳細解析 | 溶接部形状、構造不整は無視 | ホットスポット応力 | 基礎継手モデル 不整による強度低下も考慮 | 部材に表面クラック発生 |
| 構造不整解析 | 溶接のうちフランク角、脚長は考慮 偏心、目違い・角変形、ギャップ等の不整を考慮 | ホットスポット応力(不整による2次応力を考慮) | 基礎継手モデル | |
| 溶接止端部解析 | 溶接形状の近似 溶接形状の不整は無視 | ピーク応力 | 素材のS-N線図(母材、HAZ、溶接金属に対して) | 溶接止端での微小クラック発生 |
| 溶接部詳細解析 | 溶接形状の近似 溶接形状の不整を考慮 | | | |

有限要素解析は危険部位の抽出のための最も有力な手段である。一般に、船体構造の疲労強度解析を有限要素法を用いて行う場合には、先ず比較的粗い要素分割を用いたシェル要素による構造モデル(全船モデル、3船倉モデル、(1/2+1/2)船倉モデルなど)に対して前述の荷重を負荷し解析を行う。これを全体構造解析と呼び、これにより構造体の巨視的変形を把握するとともに主要支持部材のはりとしての応力を計算し危険部位の第1次候補箇所を抽出する。ここで得られるのは横桁の公称応力までと考えるべきであろう。

その後、ズーミング計算あるいはサブストラクチャ法により危険構造部位に関

するより詳細なモデル化による応力解析を実施する。これを構造詳細解析と呼び、これによって疲労き裂発生の可能性のある危険部位（溶接止端から数ミリの範囲）の第2次精査と荷重の平均応力、応力変動範囲への変換が可能になる。構造詳細解析は1段階で済むこともあるが、多段階にわたることも多い（図18参照）。この段階の解析も通常はシェル要素を用いて行う。このようにして得られる参照応力をホットスポット応力と呼ぶ。船体の疲労危険部位には、通常構造配置の不連続性に起因する応力上昇と溶接ビード形状による応力上昇が重畳されるが、ホットスポット応力算定に際しては、前者のみを抽出することとされている（図19参照）。シェル要素を用いた各種のホットスポット応力算定手法が船級協会などから提案されており（20、25）、現在国際船舶海洋構造会議で比較計算による検討が進められている（26）。

一方、溶接形状の影響も考慮した溶接止端部の応力をピーク応力と呼ぶ。この算定には一般に3次元ソリッド要素による解析が必要となり膨大な計算量を要するが、溶接止端部の工作精度を保證することによって構造の合理化が可能になる場合にはこの種の解析を行うことがある。



(a) ダブルハル・タンカーの(1/2+1/2)船倉モデル (b) 疲労強度評価のズームングモデル

図18 局部応力算定のための構造解析モデル

ホットスポット応力による疲労強度評価

ホットスポット応力が算定されると、実船と同程度のワークマンシップで製造された（不整による強度低下を考慮した）各種基礎溶接継手に対するS-N線図を用い疲労強度評価を行うことができる。ここで評価される疲労強度は、おおまかに言って危険部位溶接止端における表面き裂発生と考えられる。

溶接部のミスアラインメントなどの構造不整の影響を応力解析により明らかにするとともに建造時に不整を管理した設計・建造プロセスを採用する場合には、

不整の管理を疲労強度の品質管理に反映させることのできる疲労強度評価基準を予め用意しておく必要がある。

ピーク応力による疲労強度評価

溶接止端の応力集中の影響も考慮した応力をピーク応力と呼ぶ。この場合、溶接の止端に直接発生する応力を求めているので、疲労強度評価に用いるS-N線図は素材平滑材に対するものを用いることができ、原理的には溶接継手疲労強度データを得るための実験を大幅に削減することが可能となる。溶接形状の相違による強度変化はすべて計算に置き換えられるわけである。

アンダカット、ガスノッチなどの溶接形状の不整が実際上無視できる許容欠陥であるかあるいはグラインダ処理すべきものであるか等の基準の設定にはこの種の解析と対応する疲労強度試験が必要である。

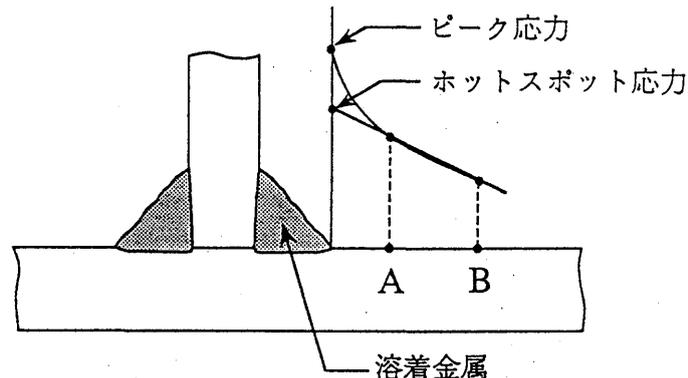


図19 ホットスポット応力

4.2 就航中に発見された疲労き裂の余寿命評価

(1) 耐損傷設計の考え方

構造設計に際して、疲労き裂の発生は許容するがその伝播がその構造体にとって危険なものとならないように定期検査と補修により構造健全性を維持する設計手法を「耐損傷設計」あるいは「損傷許容設計」と呼ぶ。この考え方は、構造軽量化が第一義的に重要な一部の航空機体設計において適用されているが、その他の構造物については、設計の段階で使用期間中の疲労き裂発生を想定することに対する社会的抵抗が根強いいため、あまり一般化していない。船体構造設計の場合も設計時には、適切な船体管理下にあつては使用期間中疲労き裂が発生しないことを基準とした「安全寿命設計」が基本的に行われていると考えられる。ただし、万一、き裂が伝播した場合にもそれが船体の大規模破壊に至らないようにするため、構造配置、構造詳細に配慮したり、高靱性材を配材する「フェイルセーフ」の考え方が一部に取り入れられている。

ところで、船体構造に限らず一般の大規模構造物では、定期検査など使用中に疲労き裂が発見されることは決して稀ではない。工作精度、荷重履歴などに関係して船体構造が設計時の想定と異なる強度限界に支配され設計時には予想できなかった不具合を生じることが有り得る。このような認識に立てば、就航中に発見されたき裂の危険性の評価を

- (a) 大規模破壊を阻止する、
- (b) リークを生じるような程度の小規模なき裂であってもそれが重大な2次災害、環境問題等を引き起こさぬようにする、

との観点から、構造部材ごとにその果たすべき機能を考慮して「機能適合性」(Fitness for Serviceability, FFS)を定義し、その後の適切な補修点検のための指針を与えることの必要性が理解されよう(図20参照)。

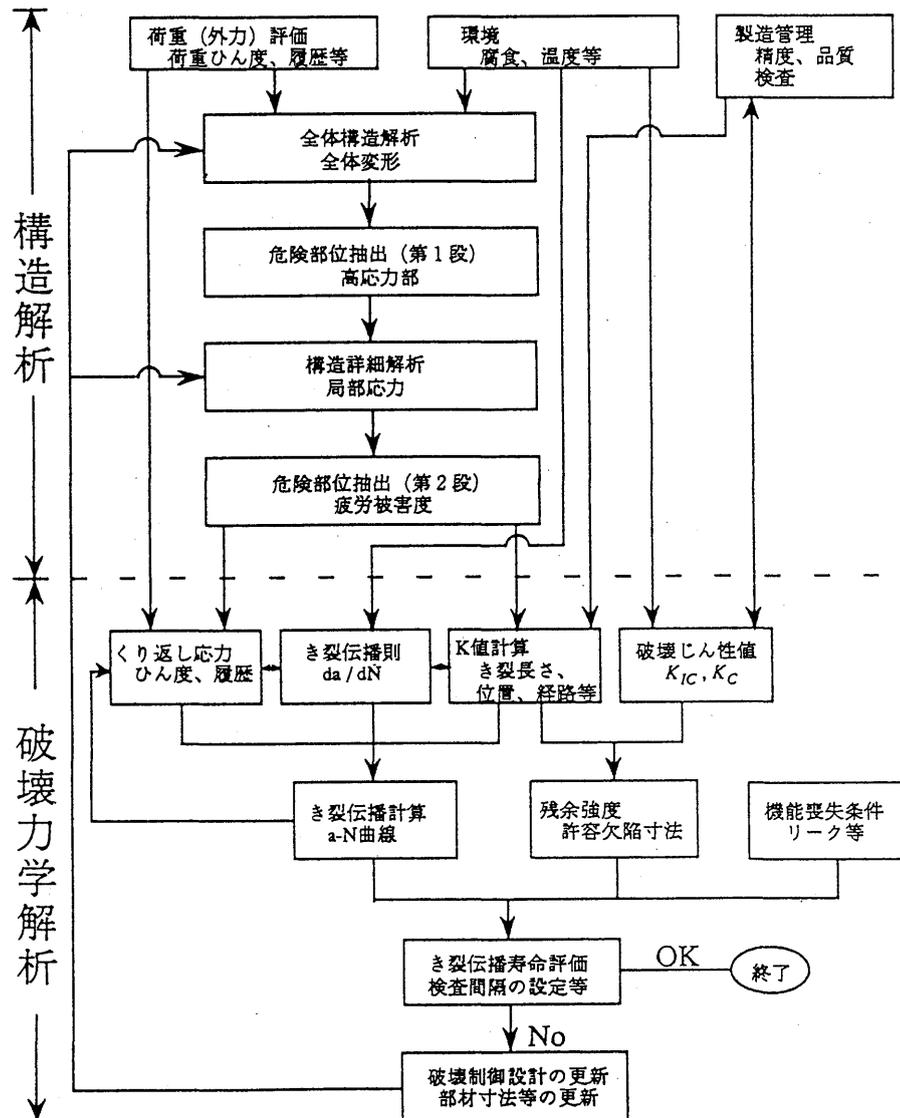


図20 耐損傷設計のための構造解析と破壊力学解析

使用中に疲労き裂が発見された場合、き裂発生部位と非発生部位の関係が設計時の構造詳細解析における危険部位評価と整合性が有るか否かをまず検討する必要がある。整合性が認められない場合には、設計時の荷重設定、工作精度等を再検討し、き裂発生部の応力分布を正確に知る必要がある。さらに必要に応じ発見されたき裂の力学パラメタを定め、次いでこの力学パラメタと材料特性であるき裂伝播抵抗値を用いて定まる不安定破壊条件および疲労き裂伝播特性式を評価し、構造内のき裂進展挙動を推定する。き裂先端の力学パラメタとしては疲労き裂進展およびぜい性破壊に対しては応力拡大係数（K値）、弾塑性破壊に対してJ値あるいはCOD値が用いられる。

(2) 船体構造におけるき裂伝播形態

船体構造における典型的なき裂伝播の形態を図21に示す(27、30)。き裂伝播は

- (i) フランジ溶接止端部の表面き裂伝播
- (ii) フランジ材の貫通き裂伝播
- (iii) ウェブ材の貫通き裂伝播
- (iv) ウェブ材から外板等の板部材への表面き裂伝播
- (v) 外板等の板部材の貫通き裂伝播

と分類できる。

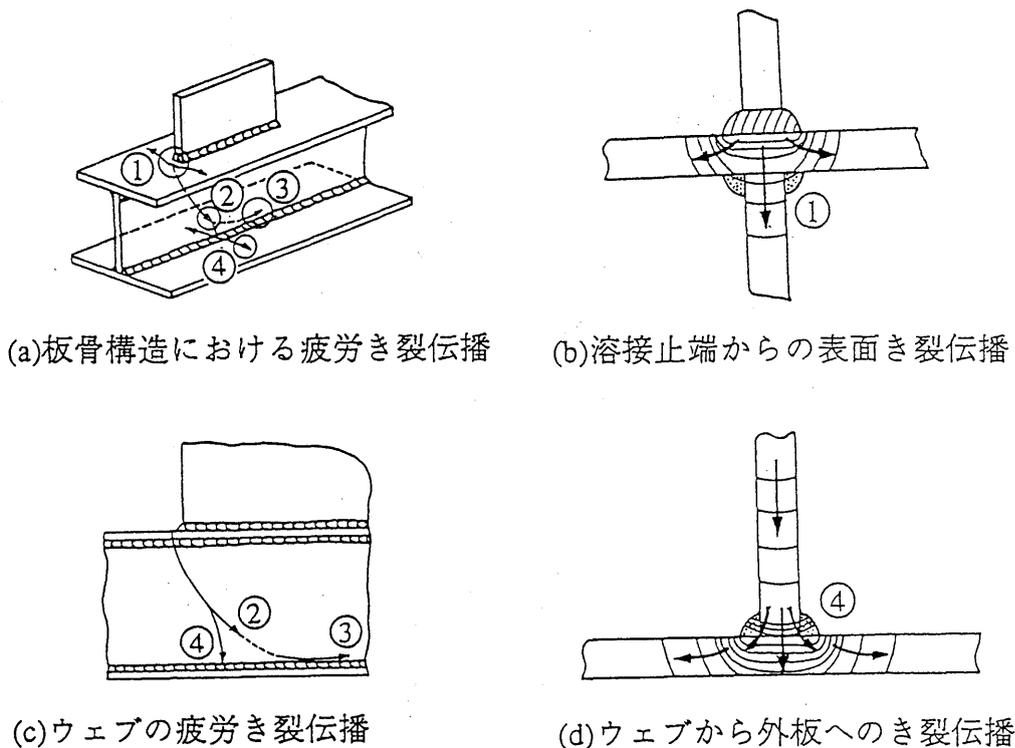


図21 船体構造における疲労き裂伝播形態

溶接止端部の表面き裂伝播については、深さ方向のき裂伝播寿命はパリズ則を用いたシミュレーションで推定可能であるが、船体構造詳細に対応した溶接残留応力分布や応力拡大係数の資料が現状では不十分なこともあり、表面におけるき裂長さの推定は必ずしも十分な精度とは言えない。き裂が板厚貫通後は2次元き裂としてモデル化できるが、フランジ内に2つのき裂先端、ウェブ内に1つのき裂先端をもつので、合計3つのき裂先端の同時き裂進展が問題となる。この段階では、き裂が比較的小さいので隣接構造への荷重再配分の影響は無い。

ウェブにおける貫通き裂伝播は2次元き裂でモデル化できるが、構造内の複雑な応力分布によりき裂伝播経路が変化することがある点を考慮する必要がある。最悪のシナリオとしてはき裂が外板へ直進し、外板を破ることが考えられる。このサイズのき裂伝播を考える場合には、隣接構造への荷重再配分の影響を考慮した解析が必要である。ウェブ材から外板等の板部材へのき裂伝播の段階では、再び3次元き裂としてのモデル化によって外板へのき裂の貫通が評価されることになる。この段階でリークや浸水が発生するので、これが構造体としての機能適合性を考えた場合の寿命を与える。外板に侵入したき裂が貫通き裂となり補強パネル内を進展するとき、大規模不安定破壊が問題となるが、これについては第5章で述べる。

4. 3 疲労き裂伝播シミュレーション

(1) 溶接止端の表面き裂伝播シミュレーション

溶接止端における疲労き裂の進展は図21の①に示す3次元表面き裂である。複雑な応力分布を呈する領域のため、現状では応力拡大係数の資料が十分ではなく、直接き裂解析を必要とする場合が多い。最近の汎用構造解析コードを用いれば原理的には解析可能であるが、最大の困難は6面体要素を用いた自動要素分割が常に成功すると限らないことである。実務面からは、き裂を含む複雑な3次元幾何形状に対する自動要素生成法、あるいはメッシュレス法などが期待されている。

(2) 周辺構造との相互作用および溶接残留応力を考慮したシミュレーション

定荷重疲労実験の溶接構造試験体を図22に示す。使用材料はHT36材である。文献[29]では、き裂伝播領域近傍で変位ズーミングによりき裂伝播シミュレーションを行い、伝播形態については実験と一致する結果を得たが、き裂伝播寿命については、一部、大幅に異なる結果を得た(28、29)。この差異の原因としては、き裂伝播による応力の再配分、溶接残留応力の影響などがあると考えられる。厳密な解析を行うために、試験体の溶接残留応力を計測し(図23)、これをき裂伝播則に反映させるとともに、試験体全体の弾性相互作用もスーパー

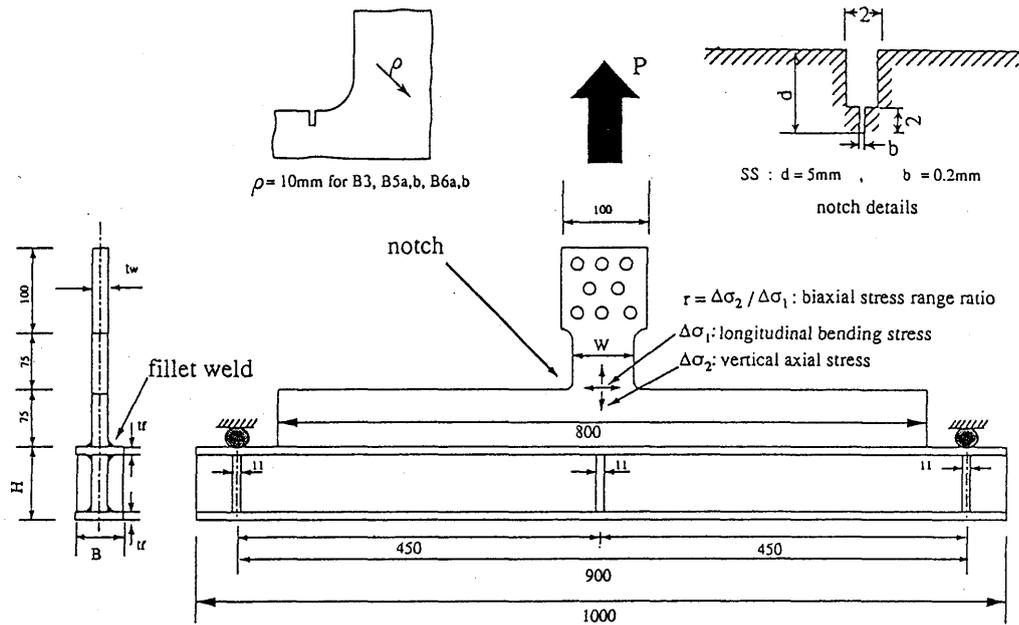


図 2 2 溶接構造疲労試験体とその荷重条件

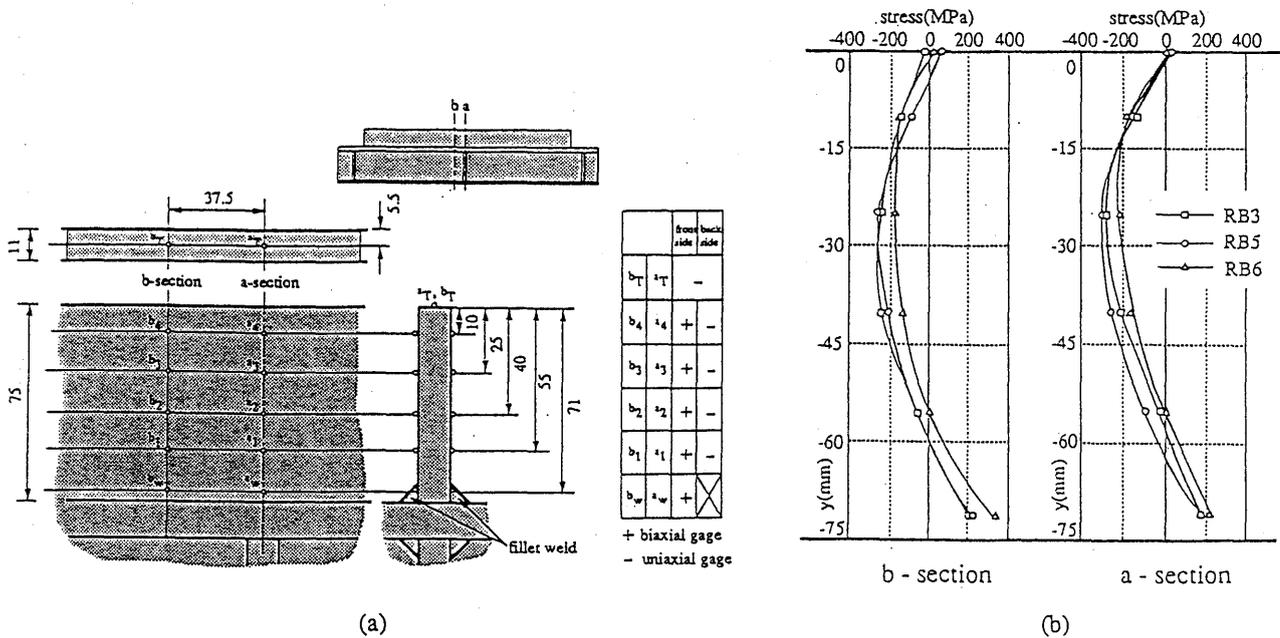


図 2 3 溶接構造疲労試験体における残留応力分布

エレメント法により³⁰⁾ 厳密にモデル化する手法を採用する。シミュレーションは

- Case A: 溶接残留応力を考慮しない変位ズーミング解析、
- Case B: 溶接残留応力を考慮した変位ズーミング解析、
- Case C: 溶接残留応力を考慮しないスーパーエレメント解析、
- Case D: 溶接残留応力を考慮したスーパーエレメント解析

の4条件で行った。図24にき裂伝播経路図の一例を示す。図25にき裂伝播寿命曲線を示すが、残留応力を考慮しない場合、実験結果と比べて極めて短寿命となる。一方、き裂進展に伴う周辺構造との弾性相互作用を考慮したスーパーエレメント解析の場合（Case D）は、良好なき裂伝播寿命評価を得ることができる。

2軸応力下でき裂の曲進が生じるような複雑な疲労き裂進展の場合、き裂伝播経路、応力再配分、および残留応力分布の相互作用により疲労き裂伝播寿命が敏感に変化する場合がある。このような場合にも、これらの要因をすべて考慮した上述のような解析を行うと、き裂伝播経路およびき裂伝播余寿命を十分な精度で予測できることが示された。

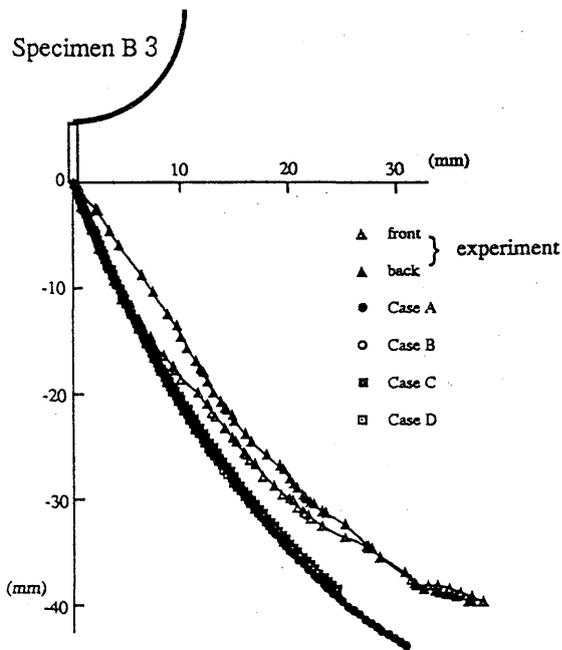


図24 き裂伝播経路の比較

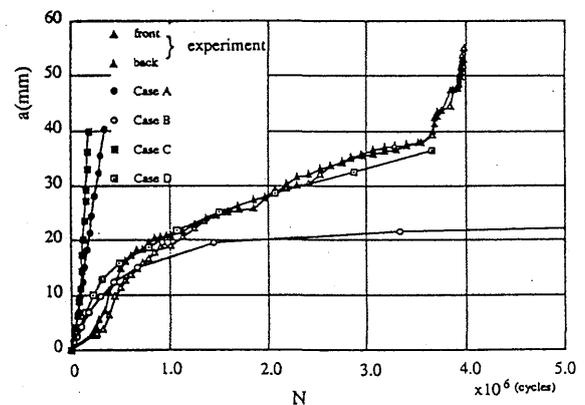


図25 き裂伝播寿命の比較

5. 経年船の大規模損傷のメカニズム

5.1 船側外板の強度

(1) 船側外板の大規模脱落に至る損傷シナリオ⁶⁾

3.2節および4.1節で述べたようにばら積船船側肋骨の上下端、即ちビルジホッパー斜板およびトップサイドタンク斜板との結合部は、腐食衰耗が顕著であり、また疲労き裂もしばしば発生する構造部位である。最近多発し、社会問題となっている老朽ばら積船の沈没事故の1次原因として船側外板の大規模な脱落がある（図26参照）。船側外板の大規模脱落に至る一連の損傷シナリオとしては

- 肋骨上下端における腐食の進行と疲労き裂の発生

- 直列複数疲労き裂（マルチサイトダメッジ）の外板への侵入
- 荒天遭遇時におけるマルチサイトダメッジの合体進展
- 大規模な船側外板の脱落

が、考えられている。

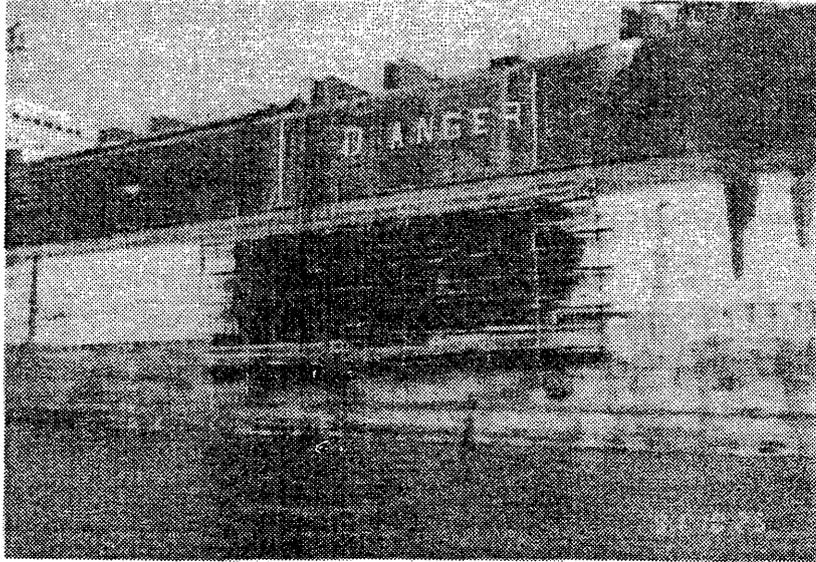


図 2 6 大規模な船側外板の脱落の事例

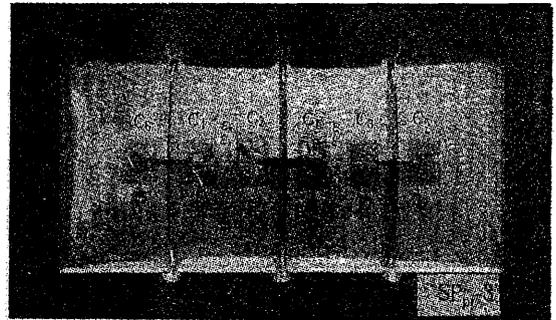
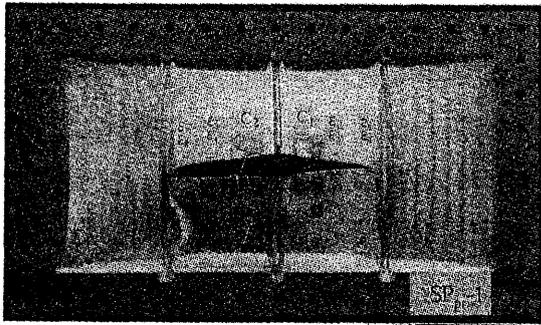
（2）横圧力を受ける補強平板の破壊試験

経年船体構造の破壊メカニズムのひとつとして、前述のように腐食や疲労によって発生する補強平板肋骨端部の複数き裂（マルチサイト・クラック）の合体による破壊が問題となる。この種の複数き裂を有する補強平板の横圧力に対する破壊強度を検討するため、平板および補強平板構造の横圧力による破壊試験を実施し、その破壊メカニズムを検討した³¹⁾。

実験に用いた試験片は3本のスチフナを有する補強平板である。ここで中央に単一き裂を有する試験片とスチフナ位置に3個の直列き裂を有する試験片の2種類の試験片を用意した。材料は何れもアルミニウム合金である。単一き裂の場合、両側の健全なスチフナの影響により、き裂進展開始後も耐荷力の低下はほとんど無い。また、き裂進展に伴いき裂先端が健全なスチフナに接近すると、耐荷力は再び上昇するが、さらにき裂がスチフナに接近するとスチフナに平行な方向へき裂の湾曲現象が起り耐荷限界に達する（図27a参照）。一方、マルチサイト・ダメッジに相当する3個の直列き裂の場合には、き裂進展開始後直ちに図27bに示すようなき裂の合体が生じる。

横圧力と試験片のたわみの関係を図28に示すが、マルチサイト・ダメッジの場合、急激に耐荷力が減少するのに対して、健全なスチフナを有する場合には、

大きな変形能があること、また健全なスチフナにはこの種の破壊に対するクラックアレスタの機能があることがわかる。これらの結果は、バルクキャリアなどの船側構造脱落の基本メカニズムの一つを実験室的に再現したものといえよう。



(a) 両側に健全なスチフナを有する場合

(b) マルチサイト・ダメージの場合

図 2 7 横圧力を受ける補強平板のき裂進展挙動

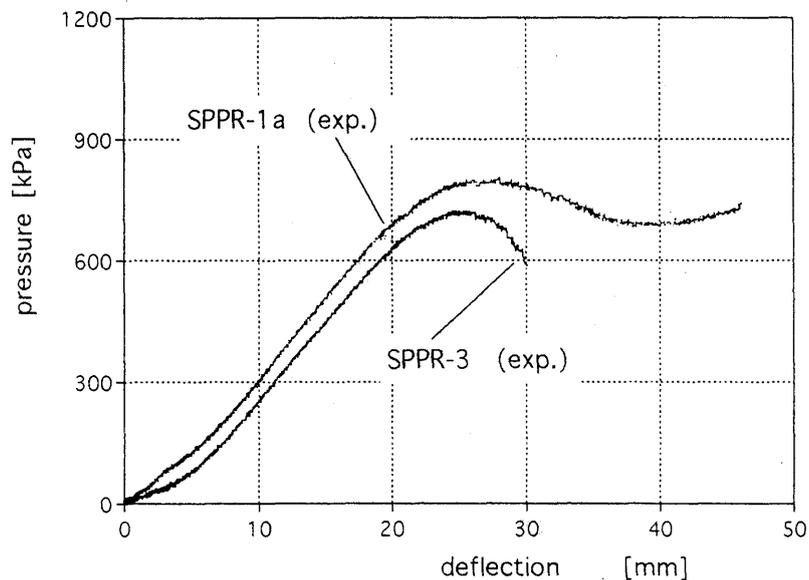


図 2 8 マルチサイト・ダメージを有する補強平板の横圧力と変形の関係
 S P P R - 1 a : 両側に健全なスチフナを有する場合
 S P P R - 3 : マルチサイト・ダメージの場合

5. 2 横隔壁構造の強度

前述の船側外板の脱落、あるいはハッチの陥没などにより船倉に浸水した場合、横隔壁には他の船倉への浸水を阻止する機能が期待される。通常の水密隔壁は、万一浸水した場合に水密を確保すればよいとの考え方に基づき塑性設計の思想を適用し設計されてきた。最近の研究でも、固着部の全塑性モーメントの仮定が適当であれば、コルゲート隔壁の上端を支持、下端を固着とし、図29に示すような2点A、Bにおける塑性ヒンジ形成により崩壊圧力推定の推定が可能であることが確認されている^{3 2)}。但し、全塑性モーメントの推定には下部スツール近傍および中央部にヒンジが形成される際の局部座屈と変形の局所化の影響が大きいので、十分な検討を必要とすることは言うまでもない。弾塑性大たわみ解析により直接最終強度を算定する場合には上記の部分の変形の局所化を表現できる細かいメッシュ分割が要求されることに注意する必要がある^{3 3)}。また、3.1節で述べたように経年船の場合腐食鋼板の変形能が低下し、応力-ひずみ関係が延性に乏しくなることを考慮する必要があることに十分注意すべきである。

ばら積船の1・2番船倉間の横隔壁の補強に関係した設計的考察に際しては、IACSの弾性計算に基づく判定と最終強度に基づく判定の是非を教条主義的に論ずるのではなく、腐食衰耗の程度に応じた最終強度の実態把握を着実にを行うことが肝要である。

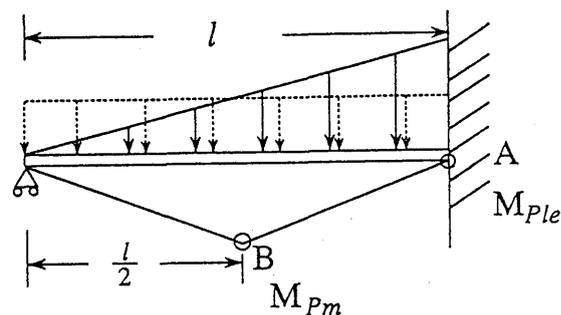


図29 横隔壁の塑性崩壊の基本的モード

5. 3 船体折損に対する強度

(1) 船体折損のメカニズム

船体折損のメカニズムを大別すると

- サギング時における甲板の座屈・塑性崩壊
- サギング時における船底部き裂破壊
- ホギング時における甲板のき裂破壊
- ホギング時における船底部の座屈・塑性崩壊

となる。積付け時あるいは荷揚げ時のミスオペレーションを除けば、船体折損は大波高時に生じると考えられる。このような場合にはサギングモーメントがホギングモーメントより大なること、また経年タンカーでは上甲板裏の腐食衰耗が著しいことなどを考慮すると、タンカーの場合サギング時の甲板の座屈・塑性崩壊が重要な折損モードとなる。また、甲板縦通肋骨に疲労き裂を有する場合には、甲板の大規模き裂破壊によりホギングによる折損が問題になる場合もある。以下、サギング状態とホギング状態に分けて折損のメカニズムを論ずる。

(2) サギングによる折損

バウフレアなどの静水面上の船体形状の影響による流体力の非線形性により大波高中では、サギングモーメントがホギングモーメントに比べ大きくなることが知られている。また、高速船の場合には、曲げモーメントの最大値が船体中央部から船首部寄りに移動することも知られており、これらの事実は既に船級の縦強度統一規則に採用されている。

サギング時の折損モードとしては、甲板の座屈・塑性崩壊と船底部のき裂破壊の可能性があるが、図30に見られるビルジキール溶接部からの破壊事例のように船底のき裂破壊^{3,4)}は経年船の問題というよりも、建造時の溶接部の工作不良に起因する疲労き裂の進展と、鋼材の靱性劣化を主要な原因と見なすべきであり、一般的な経年船固有の問題とは見なしにくい。一方、甲板の座屈・塑性崩壊はバラスタックの上甲板裏面の腐食速度が著しく速いことからわかるように経年船体固有の折損モードである。特に、図31に示すナボトカ号の解析結果^{9,10)}からもわかるように甲板縦通材の隅肉溶接の腐食が進行し、甲板縦通材が甲板から剥離するほどの衰耗を受けた場合の縦曲げ最終強度の低下は顕著であるので、このような状態に至っているか否かの十分な監視が必要である。

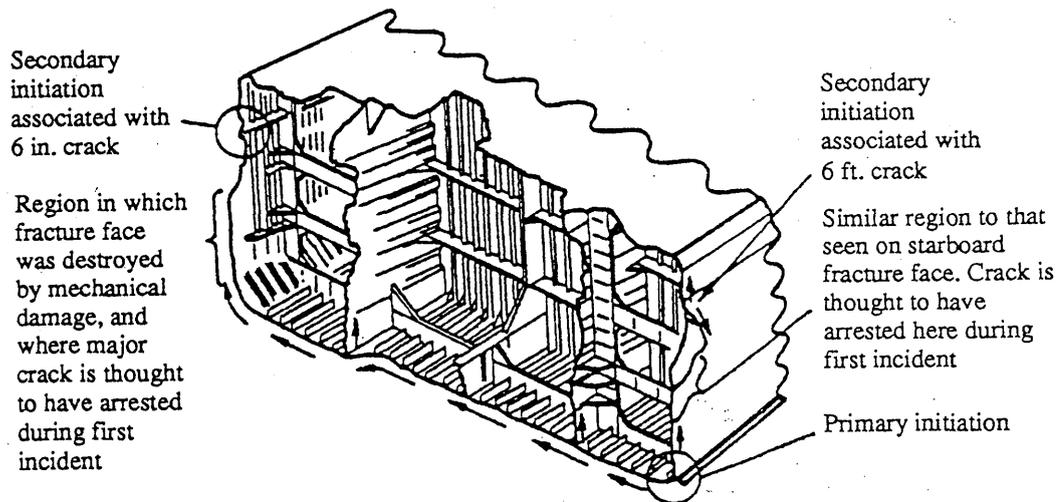


図30 船底部ぜい性き裂伝播による船体折損の事例

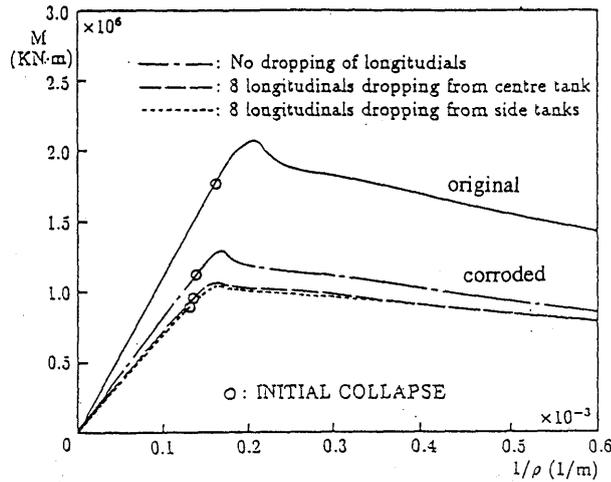


図 3 1 ナホトカ号における腐食衰耗と縦曲げ崩壊強度の関係

(3) ホギングによる折損

甲板縦通材に腐食が進行し、さらに図 3 2 に示すような疲労き裂が横一線に形成されるマルチサイト・ダメッジの場合^{3 5)}、ホギングによる縦曲げ応力により甲板の大規模き裂破壊が発生し、折損に至ることがある。甲板の引張りによるき裂進展は健全な縦通材や高靱性材により阻止できる可能性は小さく^{3 6)}、これは、5. 1 節で述べたばら積船の船側肋骨下端を伝播するき裂が健全な肋骨あるいは隔壁位置で阻止されるのと大いに異なる。き裂に対する負荷のメカニズムが前者は引張りであるのに対し後者は水圧による面外荷重であることによる差が、これには関係していると推察される。

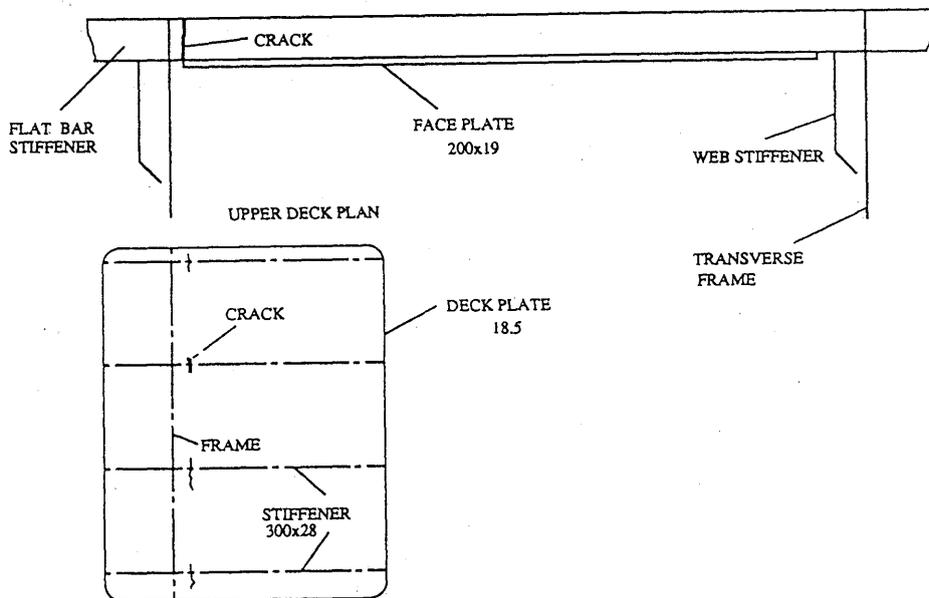


図 3 2 タンカーの上甲板におけるマルチサイトダメッジの事例

何れにしても、甲板の大規模破壊は甲板裏から甲板にき裂が侵入してから生じるわけであり、一方甲板のき裂は乗組員による目視点検が常時可能であるから、このような危険性のある経年船については甲板のき裂の点検を十分行うことによりこの種の損傷を防止すべきであると考えられる。

6. 経年船の構造健全性維持システム

6. 1 保船のための情報システム

船体には多くの経年型の損傷が生じている。このような損傷は重大事故へと拡大する可能性があるとはいえ、適切な保守管理により、重大損傷への拡大を未然に防ぐことが可能である。そのためには、検査・点検によって船体の現況を把握し、発見された損傷を的確に評価することが重要である³⁷⁾。航行中に損傷を発見した場合、緊急修理が必要かどうか、損傷の進行の可能性と危険度の推定を行い、その評価に応じた的確な処置（修理・航路の変更等）を行うことができれば、重大損傷への拡大を未然に防ぐことができると思われる。

このような保守管理の過程を効率的に支援するための手法として、コンピュータを用いた支援システムが考えられる。ところで、近年、造船CIM

(Computer Integrated Manufacturing)の研究とその実用化が進められ、プロダクトモデルを中心とした情報化による設計生産の効率化が実現しつつある。また、最近では設計生産だけではなく、運航中の船舶の保守管理を含めた、ライフサイクルサポートの考え方が提唱されるようになってきた。しかしながら、現状では保守管理の効率化や安全性の確保という観点からの情報化の試みは不十分である。

このようなシステム構築のためには、損傷情報をどのように管理するかが重要であるが、現状における問題点として以下のような項目が挙げられる。

(1) 船体損傷情報の管理は一元化されていないように思われる。例えば、船級協会は定期検査等により、ある個船に関する船体の損傷情報を入手する。一方、船会社(船主)は独自の点検により、その個船に関する損傷情報を取得していると思われる。しかしながら、それらの損傷情報が必ずしも一元的に管理されていないために、情報を有効に活用できない可能性がある。また、重大な損傷情報が関係機関に公開されないこともあり、同様な原因の損傷が繰り返されることも少なくない。すなわち、安全性を高めるための保守管理システムを構築していくには、損傷情報を一元的に管理するとともに、造船所・船会社・船級協会等の関係機関の間での適切な連携と情報の共有を含む情報管理が必要であると考えられる。

(2) 船体に生じる損傷情報は、船会社・船級協会等における検査・点検で取得

され、記録される。しかしながら、それらの記録方法は関係機関により様々であり、統一された記述方法が存在しない。そのために、情報の共有は困難な状況である。損傷情報を有効に生かすためには、損傷情報の統一的記述が必要である。

以上のような状況を改善するために、船体の損傷情報をデータベースによって一元管理し、船体の保守管理を支援する船体損傷情報システムの必要性が認識される。本論では、将来の船体損傷情報システム構築に向けた提案を行う。

6. 2 船体損傷情報システムの提案³⁸⁾

船体損傷情報システムの果たすべき役割は、常に船体の健康状態を管理し、様々な関連したデータを蓄積し、必要に応じて適切な処置が取れるようにしていくことである。これを可能にするような船体損傷情報システムを図33に示す。まず、検査等で船体に生じるき裂・腐食・座屈などの損傷情報を取得し、損傷情報データベース内に船体損傷モデルとして格納する。データベース上に、損傷位置や損傷状況等の情報を記述するために、船体自体の詳細な情報（船殻モデル）も格納しておく。そして、船体損傷評価システムではこれらの情報を用いて、損傷の危険性の評価を行ったり、メンテナンス計画および運航計画への支援を行う。すなわち、ここで提案する損傷情報データベースは、個船の健康状態を記載したカルテに当たるものであり、船体損傷評価システムでは、それを基に損傷に対する評価や支援を行うわけである。このデータベースと評価システムを合わせて船体損傷情報システムと呼ぶこととする。

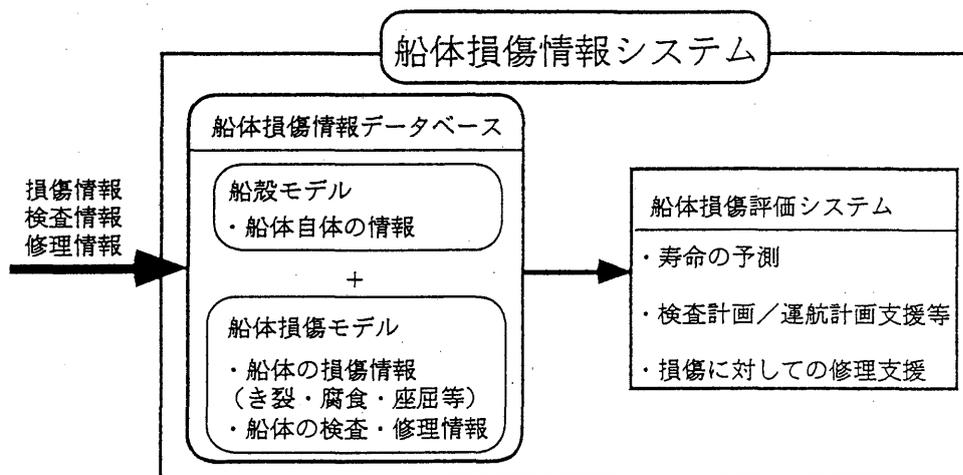


図33 船体損傷情報システムの概要

次に、このような損傷情報システムの運用形態について考えるみよう。一般に、船舶のメンテナンスの善し悪しは、最初にも述べたように状況によって大きく異なると考えられる。損傷情報システムの運用方法としては、船舶の管理のレベ

ルに応じて以下のような形態が考えられよう。

(1) 船会社による自主的損傷情報システムの運用

自主的な個船の保守管理を行う場合は、図34(a)のような運用形態が考えられる。この場合、損傷情報システムは船会社に設置され、所有船の保守管理へと活用される。まず、データベースに格納する船殻モデルについては、造船所より情報を得る。大規模な造船所においては、情報化が進むにつれて、標準化された船体のプロダクトモデルが存在するようになると考えられる。プロダクトモデルは、一般に設計や生産を支援するために用いられるが、このモデルが船体損傷情報システムに有効利用できることが望ましい。

データベースに格納する損傷情報等の取得については、船会社自身で取得した情報（損傷情報・航行時データ・修理情報等）の他に、船級協会等による検査情報等も活用することができる。一方、造船所は、船会社で管理された損傷情報や損傷評価情報を構造設計へのフィードバックに役立たせる。以上のような運用形態では、船体の管理責任者がデータベースを管理するために、損傷に関する情報が一元的に管理され、高度な保守管理が期待できる。

(2) 船級協会によるデータベースの管理

通常のメンテナンスレベルの船舶においては、図34(b)のように、船級協会に損傷情報システムを設置することが考えられる。船会社が管理する場合と同様に、造船所は建造した船体の船殻モデルを船級協会に送り、船級協会はこれを利用して船体損傷データベースを構築する。造船所は、船級協会で管理された損傷情報や損傷評価情報を参考に、構造設計へのフィードバックに役立たせる。また、船会社は、保守管理の充実のためにその情報を利用する。船級協会自身も、それらの情報をもとにルールの変更、船級維持を行うことができる。このように、本運用形態においては、船級協会のような中立機関が損傷情報を管理評価し、ネットワークを通じてこれらの情報を各関係機関から収集したり必要に応じて発信する仕組みとなる。よって、各関係機関（特に船会社）の協力と情報の共有化を押し進めることが重要となる。また、本運用形態では、関係機関の間に限定した個船情報の共有だけでなく、必要に応じて一般情報を公開することも考えられる。このように本運用形態においては、個船情報と一般情報とを適切に区別して必要に応じた公開が行える情報管理が必要になる。

(3) 公的機関によるデータベースの管理

十分な保守管理が行われていないサブスタンダード船等に対する厳重な監視を行うには、政府機関等の公的機関が中心となって、強制的に船体損傷情報を管理することが必要となるであろう（図34(c)）。ポートステートコントロール等

で、危険な船舶の存在が確認された場合は周辺の住民に知らせる必要も生じるであろう。また、関係機関との緊密な連携とともに、船級協会による管理と同様に一般情報の発信も重要な役割となるであろう。

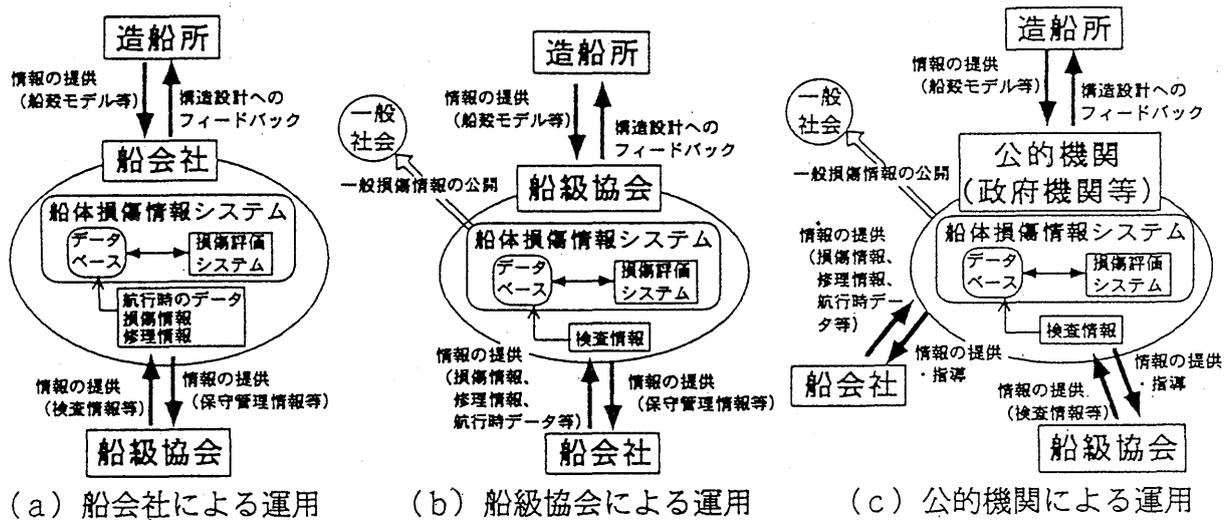


図 3 4 船体損傷情報システムの種々の利用形態

6. 3 保船・船体健全性維持システムの開発に関する今後の課題

保船・船体健全性維持システムの開発には船社、船級、監督官庁、造船所がそれぞれ異なった立場で関係するが、要は

- 検査・点検のし易い構造様式・仕様
- 検査・点検のし易い支援デバイス
- 検査・点検結果に基づく判定のし易い支援情報システム
- 補修のし易い構造様式・仕様
- 補修履歴の検索し易い支援情報システム

をいかに研究し、開発するかということであろう。

ヒューマン・インターフェイスの観点から、保船・船体健全性維持システムを考えると、この問題には上記関係者が複雑に関係しており、場合によっては利害の対立することも有り得ることがわかる。何れにしても従来これらの機関が占有している情報を必要に応じて共有し、互いの問題を理解することが先ず必要であり、それによって船舶の安全を確保するための各種の新しい道具や仕組みが生まれてくることになるであろう。

7. 結論

多様性こそ経年船の特質である。特に経年船の強度を定量的に論ずる際に考慮しなければならないのは、経年劣化による強度パラメータの平均値の低下もさることながら、むしろその分散の増大である。検査や点検の質・量なども含めこのバラツキの増大が経年船に発生する予期せぬ大規模損傷の原因と理解すべきである。本論では、このばらつきを発生させる強度要因である腐食と疲労き裂について現時点でわかる範囲でその特質を述べたが、その中でも経年船の変形能の低下は注目すべき性質であろう。一般論としてはバラツキの大きい経年船の強度を的確に把握するには、個船として強度を評価する必要があるためには、運航履歴、検査・点検履歴情報に基づく個船の現況の把握が極めて重要であることが理解されよう。

参考文献

- 1) 嶋田武夫、「老朽船問題とP S C」、日本造船学会誌 829, 1998, p.453.
- 2) 運輸省海上技術安全局安全基準課、「老朽船の安全問題に関するI M Oへの提案」、日本造船学会誌 830, 1998, pp.512-513.
- 3) 谷野龍一郎、「ナホトカ号事故を教訓とした運輸省の施策について」、日本造船学会誌 830, 1998, pp.514-517.
- 4) 矢部哲、「海事分野の安全性の考え方—船舶の国際的安全規制の現状と課題—」、第1回海事工学シンポジウム、日本学術会議、東京、1998.
- 5) 嶋田武夫、「海事分野の安全性の考え方—船舶の安全性担保とP S C強化—」、第1回海事工学シンポジウム、日本学術会議、東京、1998.
- 6) 矢尾哲也、角洋一、村上彰男、阿部孝三、熊野厚、経年後の船体強度、「経年船の安全を考える」第3章、日本造船学会船体構造委員会D A - W G、1995, pp.45-104.
- 7) シンポジウム「経年船の安全を考える」における討論要旨、日本造船学会誌 798, 1995, pp.926-934.
- 8) 恵美洋彦、湯浅通史、熊野厚、山本規雄、有馬俊朗、海野昌俊、適切な船体防食管理法に関する研究、日本海事協会会誌 225-IV, 1993, pp.184-209.
- 9) ナホトカ号事故原因調査委員会、「ナホトカ号事故原因調査報告書」、運輸省、1997.
- 10) 矢尾哲也、角洋一、竹本博安、熊野厚、末岡英利、大坪英臣、ナホトカ号事故時の強度推定、日本造船学会論文集、167, 1998, pp.229-236.
- 11) 辻恒平、久田俊明、北川英夫、腐食表面の三次元的不規則性のスペクトル

- 解析による評価、日本機械学会論文集、A-49, 436, 1983, pp.331-340.
- 1 2) 辻恒平、久田俊明、北川英夫、Filtered Poisson Process に基づく全面腐食形状のモデル化とその評価、日本機械学会論文集、A-50, 453, 1984, pp.1035-1041.
 - 1 3) D. Liu, Official Discussion to Committee II.1, Proceedings of ISSC'97, Vol.3, Elsevier, 1998.
 - 1 4) 超大型浮体式海洋構造物（メガフロート）平成7年度研究成果報告書、メガフロート技術研究組合、1996.
 - 1 5) 造船技術研究開発平成10年度実施計画調書、造船技術開発協議機構、1998.
 - 1 6) 岡実、北田博重、渡辺富雄、腐食材の静的強度に関する実験的考察、日本造船学会論文集、167, 1990, pp.229-236.
 - 1 7) 山本善之、大坪英臣、角洋一、藤野正隆、船体構造力学（二訂版）、成山堂、1997.
 - 1 8) 水上知夫、石川一郎、最近の船体損傷の傾向と対策、日本海事協会誌 227-II, 1994, pp.115-131.
 - 1 9) 情報技術部、1996年の船体損傷のまとめ、日本海事協会誌 242-I, 1998, pp.14-20.
 - 2 0) Class NK, Guidance for Fatigue Design of Ship Structures, Nippon Kaiji Kyoukai, 1996.
 - 2 1) 渡辺巖、斜め波中を航走する船体に働く Diffraction Pressure の実用的計算法、関西造船協会誌、221, (1994), pp.83-89.
 - 2 2) 倉本美男ほか、波浪中の船体局部応力のシミュレーション手法に関する研究、日本造船学会論文集、170, 1991, pp.426-437.
 - 2 3) E. Watanabe et al., Proposal of Simplified Fatigue Design Method for Side Longitudinals, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 177, 1995, pp.391-398.
 - 2 4) 角洋一、任意の表面不整による応力集中の擾動法による解析、日本造船学会論文集、172, 1992, pp.403-408.
 - 2 5) Technical Report 93-0432, Fatigue Assessment of Ship Structures, Det Norske Veritas, 1995.
 - 2 6) Y. Sumi et al., Report of Technical Committee II.1 on Quasi static response, Proceedings of 13th International Ship and Offshore Structures Congress, (ed. T. Moan and S. Berge), Elsevier, Oxford

- 1997, pp.123-186.
- 2 7) Y. Tomita, M. Toyosada, Y. Sumi, and A. Kumano, Fatigue Crack Propagation in Ship Structures, Chapter 44 in Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures (Vol. 2), (ed. A. Carpinteri), Elsevier, 1994, pp.1609-1642.
 - 2 8) Y. Sumi, Chen Yang, S. Hayashi, Morphological Aspects of Fatigue Crack Propagation - Part I, International Journal of Fracture, 82-3, 1996, pp.205-220.
 - 2 9) Y. Sumi, Chen Yang, and Z. N. Wang, Morphological Aspects of Fatigue Crack Propagation - Part II, International Journal of Fracture, 82-3, 1996, pp.221-235.
 - 3 0) Y. Sumi, Fatigue Crack Propagation and Computational Remaining Life Assessment of Ship Structures, Journal of Marine Science and Technology, 3-2, 1998, pp.102-112.
 - 3 1) Y. Sumi, Z. Bozic, H. Iyama, and Y. Kawamura, Fracture of a Stiffened Panel with Multiple Site Cracks under Lateral Pressure, Proceedings of PRADS'98, Elsevier, Amsterdam, 1998, pp.873-878.
 - 3 2) H. Konishi, T. Yao, T. Shigemi, O. Kitamura, and M. Fujikubo, Design of Corrugated Bulkhead of Bulk Carrier against Accidental Flooding Load, Proceedings of PRADS'98, Elsevier, Amsterdam, 1998, pp.157-163.
 - 3 3) 三菱重工業(株)長崎研究所強度研究室、Bulk CarrierのT. BHDの浸水時挙動シミュレーション(RR74部会検討より)、第185回船体構造委員会関東地区部会資料(東98-1)、1998.
 - 3 4) S. J. Garwood, Investigation of the MV *Kurdistan* Casualty, Engineering Failure Analysis, 4-1, 1997, pp.3-24.
 - 3 5) SR219総合報告書、(社)日本造船研究協会、1994.
 - 3 6) Y. Sumi, Z. Bozic, H. Iyama, and Y. Kawamura, Multiple Fatigue Cracks Propagating in a Stiffened Panel, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 179, 1996, pp.407-412.
 - 3 7) 船のメンテナンス研究会編、船のメンテナンス技術、成山堂、1997.
 - 3 8) 川村恭己、角洋一、関智哉、船体損傷情報システムに関する研究、日本造船学会論文集、184, 1998, (印刷中)

以下の頁は著作権者の許諾を得ていないため、公表できません。

p. 72 ~ p. 81

p. 118 ~ p. 133

p. ~ p.

p. ~ p.

p. ~ p.

4. 損傷情報システム構築に向けて —システム支援のための解析手法—

- 4. 1 事後誤差評価法
- 4. 2 座屈に関する解析
- 4. 3 複合荷重をうける船体防撓板構造の最終強度解析法
- 4. 4 Development of the automatic quadrilateral mesh generator based on the paving method for a crack propagation analysis

4.1 事後誤差評価法

広島大学工学部 北村 充

4.1.1 緒言

有限要素法は構造問題を中心とした幅広い分野で利用されている有力な工学解析手法であるが、解の精度はメッシュ分割に大きく依存する。総自由度数を増加することにより有限要素解の精度は向上するが、コンピュータの処理能力やメッシュ生成能力などの制約があり、したがって、用いる有限要素モデルにも限界が存在する。このような背景から、限定された自由度数を用いて最も精度の高い解を得るための様々な研究が行われている。「精度の高い解析」には複数の定義が存在するが、本論文は全解析領域における誤差を最小にすることを目標にする。この目標達成のためには、

- 1) 有限要素解析において発生する事後誤差評価^{1~5)}
- 2) 事後誤差に基づいたアダプティブリメッシング⁶⁾

が必要となる。

アダプティブリメッシングは、誤差エネルギーノルムの分布に応じて要素代表長さをコントロールすることにより、少ない要素を用いても精度の高い有限要素解析を実現するメッシュを提供する。特に、き裂を含む問題は特異性が発生するため、要素サイズの決定には十分な注意が必要である。本論文はアダプティブリメッシングにおいて重要となる要素代表長さの決定方法を、特に、き裂問題などの特異性を有する2次元弾性問題を対象として研究する。

4.1.2 有限要素解の事後誤差評価法

弾性問題は次の支配方程式と境界条件式により与えられる。

支配方程式

$$\nabla \cdot (D\nabla^* u) + f = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

境界条件式

$$(D\nabla^* u)n = \bar{q} \quad \text{on } \Gamma_F \quad (2)$$

$$u = \bar{u} \quad \text{on } \Gamma_D \quad (3)$$

ここで、 Ω は境界力を与えられる境界 Γ_F と変位拘束を受ける境界 Γ_D に囲まれた応力場である。 \bar{q} と \bar{u} はそれぞれの境界上で与えられる境界力と変位である。 f は体積力ベクトルの増分、 n は Γ_F 上の単位法線ベクトルである。 D と ∇^* は応力-ひずみ、ひずみ-変位の関係を与えるオペレータである。

弾性問題の事後誤差は次のような境界値問題として記述される²⁾。

支配方程式

$$\nabla \cdot (D\nabla^* e) + r = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (4)$$

境界条件式

$$(D\nabla^* e)n = -\rho_{ij} \quad \text{on } \Gamma_{ij} \quad (5)$$

$$(D\nabla^*e)n = -\rho_i \quad \text{on } \Gamma_F \quad (6)$$

$$e = 0 \quad \text{on } \Gamma_D \quad (7)$$

ここで、 e は変位誤差を有するベクトル、 r は有限要素解の平衡方程式(1)における残差ベクトル、 ρ_{ij} は要素 $i \cdot j$ 間における境界力不連続量、 ρ_i は要素 i と境界 Γ_F 間における境界力不連続量である。上式で示される境界値問題に対して有限要素法を用いることにより事後誤差を得ることができるが、事後誤差の主成分は元の応力解析に用いた近似関数より1階高次であるため、誤差の境界値問題を解くためには応力解析に用いた近似関数より高次の近似関数を用いる必要がある。4節点四角形要素により応力解析を行った場合、8節点四角形要素以上の要素を用いて事後誤差解析を行うことになる。しかし、高次の近似関数を用いると莫大な計算量になってしまうため、次の境界値問題を要素ごとに解く。

支配方程式

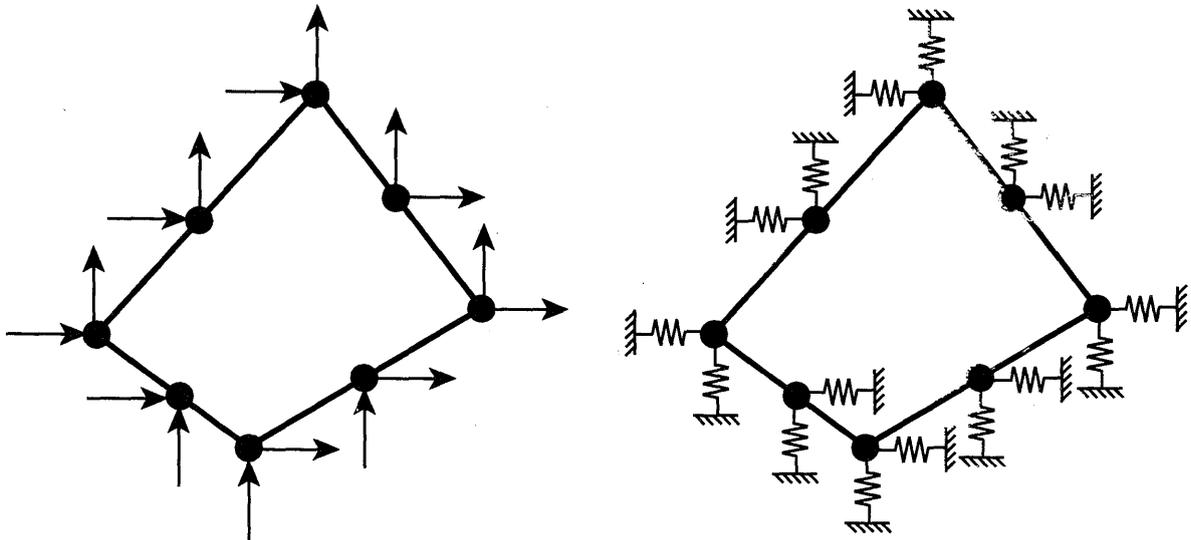
$$\nabla \cdot (D\nabla^*e) + r = 0 \quad \text{in } \Omega_i \quad (8)$$

境界条件式

$$(D\nabla^*e)n = -\bar{\rho}_i \quad \text{on } \Gamma_i \quad (9)$$

$$e = 0 \quad \text{on } \Gamma_D \quad (10)$$

ここで、 Ω_i は要素 i の領域、 Γ_i は要素 i の境界、 $\bar{\rho}_i$ は各要素が分担する境界力不連続量である。Fig.1-a)に8節点四角形要素により事後誤差解析の様子を示す。図中の矢印は $-\bar{\rho}_i$ や r による等価節点力であるが、これらの力は自平衡条件を満足しなければならない。また、変位拘束を受ける境界条件が全要素に負荷されているわけではなく、変位誤差を求めるためには剛体変位が除去されなければならない。これらの条件を満足するために、Fig.1-b)に示される低剛性を有するばね要素を導入した。各要素ごとに事後誤差の境界値問題を解くことにより、変位誤差を評価する。



a) Nodal forces for error analysis

b) Spring element with low stiffness

Fig.1 A posteriori error analysis with an 8-node element

4.1.3 アダプティブリメッシング

以下に示されるエネルギーノルムを用いて誤差量を表現する^{1,2)}.

$$\|\mathbf{u}\| = \sqrt{\int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\epsilon} d\Omega} \quad (11)$$

$$\|\mathbf{e}\| = \sqrt{\int_{\Omega} \Delta \boldsymbol{\sigma}^T \Delta \boldsymbol{\epsilon} d\Omega} \quad (12)$$

$$\eta = \|\mathbf{e}\| / \|\mathbf{u}\| \quad (13)$$

ここで、 $\|\mathbf{u}\|$ と $\|\mathbf{e}\|$ は、それぞれ、応力のエネルギーノルムと誤差のエネルギーノルムである。 $\boldsymbol{\sigma}$ と $\boldsymbol{\epsilon}$ は、それぞれ応力成分とひずみ成分を有するベクトルであり、 $\Delta \boldsymbol{\sigma}$ と $\Delta \boldsymbol{\epsilon}$ はそれらの誤差量を有するベクトルである。つまり、

$$\Delta \boldsymbol{\epsilon} = \nabla^* \mathbf{e} \quad (14)$$

$$\Delta \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \Delta \boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{D} \nabla^* \mathbf{e} \quad (15)$$

式(13)の η は相対誤差であり、有限要素解析の精度を評価するための基準として用いる。Zienkiewicz¹⁾らは $\eta = 5\%$ を信頼できる有限要素解析の目安としている。有限要素解析により求められた応力のエネルギーノルムを $\|\hat{\mathbf{u}}\|$ とすると、厳密な $\|\mathbf{u}\|$ との間には次の関係が成立する。

$$\|\mathbf{u}\| = \sqrt{\|\hat{\mathbf{u}}\|^2 + \|\mathbf{e}\|^2} \quad (16)$$

4.1.3.1 特異性の無い領域におけるアダプティブリメッシング

解析領域 Ω における弾性問題の有限要素解析を考える。特異性が存在しない場合、この領域に対してFig.2に示されるような一様リメッシングを行なうと、次の関係が成立する。

$$\|\mathbf{e}\| = (h/\bar{h})^p \|\bar{\mathbf{e}}\| \quad (17)$$

ここで、 $\|\bar{\mathbf{e}}\|$ と \bar{h} は旧分割メッシュにおける誤差エネルギーノルムと要素代表長さであり、 $\|\mathbf{e}\|$ と h はリメッシングにより得られた新分割メッシュにおけるものである。全要素において h/\bar{h} が等しいことは必要であるが、 h や \bar{h} が全要素において等しい必要はない。また、 p は用いられた有限要素の近似関数の次数である。リメッシングにより要素数や要素代表長さが増えるが、それらの関係は次式により与えられる。

$$(h/\bar{h})^n = \bar{M}/M \quad (18)$$

M と \bar{M} は、それぞれ、新旧の分割メッシュに用いられた要素数、 n は空間次元数である。式(17)と(18)より

$$\|\mathbf{e}\| = (\bar{M}/M)^{p/n} \|\bar{\mathbf{e}}\| \quad (19)$$

を得る。各要素の形状関数が等しい弾性問題において、最小誤差を有する有限要素解析は各要素の誤差エネルギーノルム $\|\mathbf{e}\|_i$ が全領域において等しくなることに帰着する^{1,2)}。この等しい

要素の誤差エネルギーノルムを e^m により表記する. 新分割メッシュにおいて全要素 (M 個) の要素の誤差エネルギーノルムが e^m であるならば, 領域 Ω 上の誤差エネルギーノルムは

$$\|e\| = \sqrt{\sum_{j=1}^M (\|e\|_j)^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^M (e^m)^2} = \sqrt{M}e^m \quad (20)$$

になる. 解析に望む精度として目標相対誤差 ($\bar{\eta}$) が与えられると, 式(13)と(20)より次の関係が得られる.

$$\bar{\eta}\|u\| = \sqrt{M}e^m \quad (21)$$

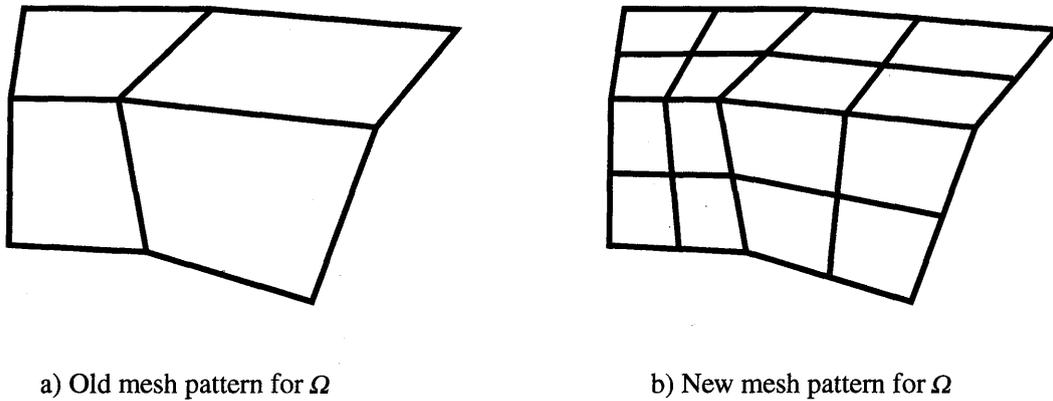


Fig.2 Uniform remeshing on region Ω

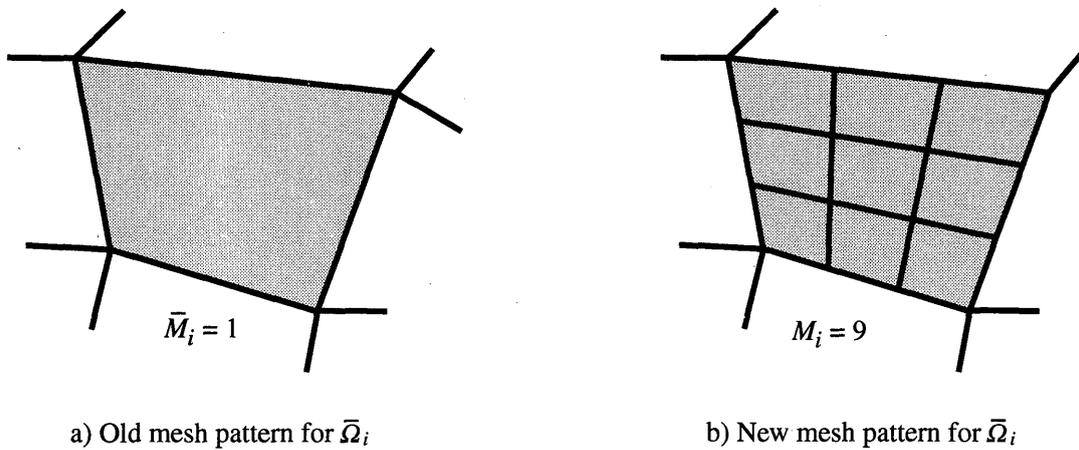


Fig.3 Mesh sub-divisions on region $\bar{\Omega}_i$

次に, 旧分割メッシュの1つの要素 i とこの要素が存在する領域 $\bar{\Omega}_i$ に注目する. 事後誤差評価により誤差エネルギーノルム $\|\bar{e}\|_i$ は既知となり, 旧分割メッシュの要素代表長さ \bar{h}_i も与えられる. Fig.3 に示されるように, リメッシングによりこの要素は M_i 個の要素に分割されるが, 生成される各要素の誤差エネルギーノルムが e^m になるように分割数 M_i を決定したい. 式(19)が $\bar{\Omega}_i$ 上で成立する場合, この領域におけるリメッシング後の誤差エネルギーノルムは次式により与えられる.

$$\|e\|_i = (M_i)^{-p/n} \|\bar{e}\|_i \quad (22)$$

ここで $\|e\|_i$ は新分割メッシュを用いた有限要素解析において $\bar{\Omega}_i$ 上に発生した誤差エネルギーノルムである。また、式(20)が $\bar{\Omega}_i$ 上で成立する場合、この領域上の誤差エネルギーノルムは次式になる。

$$\|e\|_i = \sqrt{M_i} e^m \quad (23)$$

式(22)と(23)より、 $\bar{\Omega}_i$ 上に生成されるべき要素数 M_i が次のように決定される。

$$M_i = (\|\bar{e}\|_i / e^m)^{2n/(n+2p)} \quad (24)$$

上記過程を旧分割メッシュ上の全要素に適用すると、解析領域 Ω 上の全要素数 M が次式により得られる。

$$M = \sum_{i=1}^{\bar{M}} M_i = \sum_{i=1}^{\bar{M}} \left(\frac{\|\bar{e}\|_i}{e^m} \right)^{2n/(n+2p)} \quad (25)$$

式(21)と(25)より、新分割メッシュの各要素が有すべき誤差エネルギーノルムの値 (e^m) が決定できる。

$$e^m = (\bar{\eta} \|u\|)^{(n+2p)/2p} A^{-(n+2p)/4p} \quad (26)$$

ここで

$$A = \sum_{i=1}^{\bar{M}} (\|\bar{e}\|_i)^{2n/(n+2p)} \quad (27)$$

式(18)より、 M_i , h_i , \bar{h}_i の関係は

$$M_i = (\bar{h}_i / h_i)^n \quad (28)$$

により与えられるため、式(24)と(28)より、領域 $\bar{\Omega}_i$ 上の新しい要素代表長さが次式により決定できる。

$$h_i = \bar{h}_i (e^m / \|\bar{e}\|_i)^{2/(n+2p)} \quad (29)$$

4.1.3.2 特異性を有する領域におけるアダプティブリメッシング

前節の議論は特異性が存在する問題においては成立しない。Fig.4に a) 正方形孔と b,c) クラックを有する平板問題を示すが、図のハッチ部には特異性が存在する。特異性の強さは a) と b) の問題で異なるだけでなく、1つの問題においても、コーナー部やクラック先端からの距離にしたがって差が発生する。c) は b) と同じ物体であるが、荷重条件が異なることにより、特異性は発生しない。このように、特異性の強さは解析する構造物の形状と荷重状態に依存するものであり、解析以前に予測することは困難である。そこで、特異性の強さを支配するパラメータ

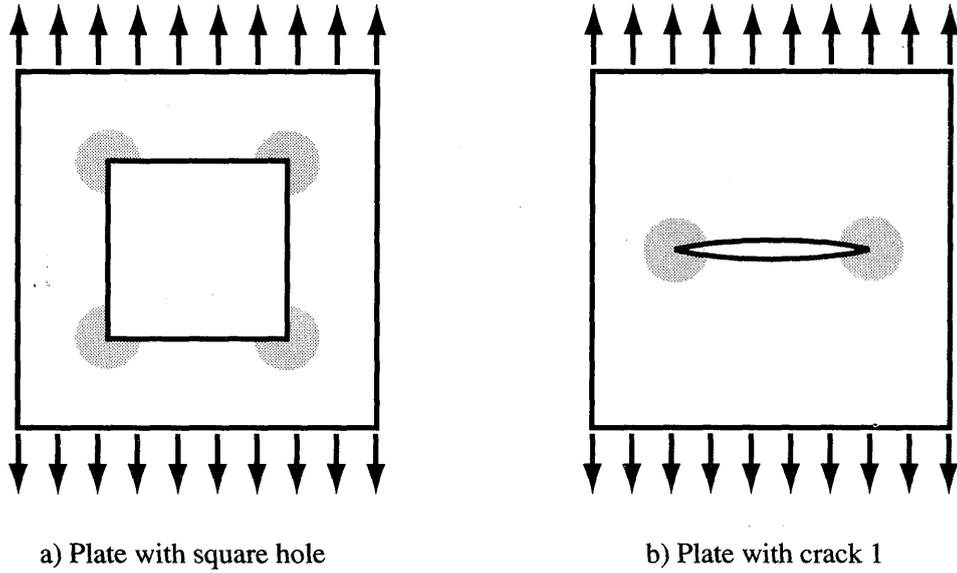


Fig.4 Stress singularities

を導入し、アダプティブ有限要素解析の過程における誤差の減少率からこのパラメータ値を予測する方法を提案する。

領域 $\bar{\Omega}_i$ のリメッシング前後の誤差エネルギーノルムと要素代表長さの関係が次式により与えられると仮定する。

$$\|e\|_i = (h_i/\bar{h}_i)^{p\beta_i} \|\bar{e}\|_i \quad (30)$$

β_i は問題に依存する特異性の度合いを示すパラメータであり、上式より

$$\beta_i = \frac{\log(\|e\|_i/\|\bar{e}\|_i)}{p \log(h_i/\bar{h}_i)} \quad (31)$$

になる。 β_i は領域 $\bar{\Omega}_i$ ごとに異なる量であるが、特異性が存在しない領域では $\beta_i = 1.0$ になる。連続するアダプティブリメッシングとその事後誤差解析結果を用いて、式(31)より β_i を求める

ことができる. 式(23), (28), (30)より, 特異性を有する領域上のリメッシングにおいて, e^m を提供する要素代表長さが次式のように求められる.

$$h_i = \bar{h}_i (e^m / \|\bar{e}\|_i)^{2/(n+2p\beta_i)} \quad (32)$$

4.1.4 要素代表長さに基づいたリメッシング

式(29)や式(32)により旧分割メッシュにおいて要素 i が存在した領域 $\bar{\Omega}_i$ に対して適切な要素代表長さ h_i を決定でき, その数値を式(28)に代入することにより M_i が求められる. しかし, このように決定された M_i は, 一般的には, 自然数にはならない. また, 隣り合う要素は要素境界上で節点を共有するが, 要素ごとに得られた h_i が適合する分割数を与えることも期待できない. このような問題点を解決するためには, 全解析領域上で連続する要素代表長さの分布関数を作成し, その分布に従ったリメッシングを行えばよい.

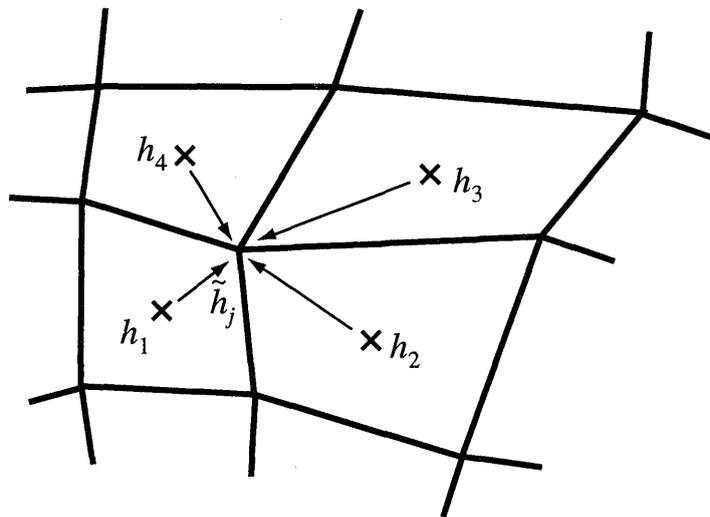


Fig.5 Effects of h_i on \tilde{h}_j

Fig.5に示されるような旧分割メッシュの要素領域 $\bar{\Omega}_1 \sim \bar{\Omega}_4$ に対する $h_1 \sim h_4$ が求められたとする. これらの要素が共有する節点 j における要素代表長さ \tilde{h}_j を次式により決定する.

$$\tilde{h}_j = \frac{\sum_{i=1}^4 W_i h_i}{\sum_{i=1}^4 W_i} \quad (33)$$

W_i は h_i の重みであるが, $W_i = 1$ や $W_i = 1/L_i$ などが代表的なものである. L_i は要素 i の重心と節点 j 間の距離である. 求められた節点における要素代表長さと有限要素の形状関数 $N_j(x, y)$ に基づいて要素代表長さの分布関数を次式により決定する.

$$h(x, y) = \sum_j N_j(x, y) \tilde{h}_j \quad (34)$$

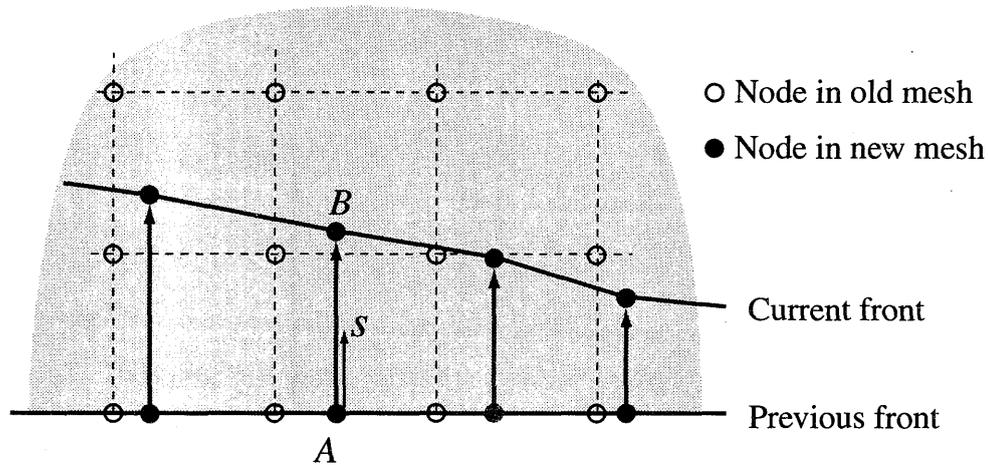


Fig.6 Allocation of new nodal points and front

本研究はフロント法⁷⁾に基づいたメッシュ生成を行っているが、Fig.6に示されるように、領域内部に向かってフロントを更新することにより節点と要素を生成する。点A近傍の旧フロントの角度により点Bを発生する方向が決まり、要素代表長さにより点AとBの間隔を決める。本研究では、点AB間の距離 h_{AB} が⁸⁾

$$h_{AB} = \int_A^B h(x,y)ds/h_{AB} \quad (35)$$

を満足するように点AとBの間隔を決定する方法を用いる。

4.1.5 例題

4.1.5.1 円孔を有する平板の問題

Fig.7に示される円孔を有する正方形板の引っ張り問題に対して、上記手法に基づいたアダプティブ有限要素解析を行なう。問題の対称性により、1/4モデルを用いた有限要素解析を実行する。step-1の分割メッシュを用いて有限要素解析と事後誤差解析を行い、得られた相対誤差 η が半分程度に減少するように目標相対誤差 $\bar{\eta}$ を定め、step-2の分割メッシュを生成する。これは特異性を有さない問題であるため、式(29)により決定された要素代表長さをを用いている。このようなアダプティブリメッシングを連続して行い、その結果をFig.8および表1に示す。 $\eta^{est}/\bar{\eta}$ はアダプティブリメッシングの進行と共に1に収束しており、要求された精度を満足するアダプティブ有限要素解析が可能である。この比が1より大きくなっている理由としては、初期のアダプティブリメッシングにおいては要素数が少ないため、

- 1) 事後誤差ノルム情報が正確でない。
- 2) 要素代表長さに忠実なメッシュ分割が困難である。

が考えられる。

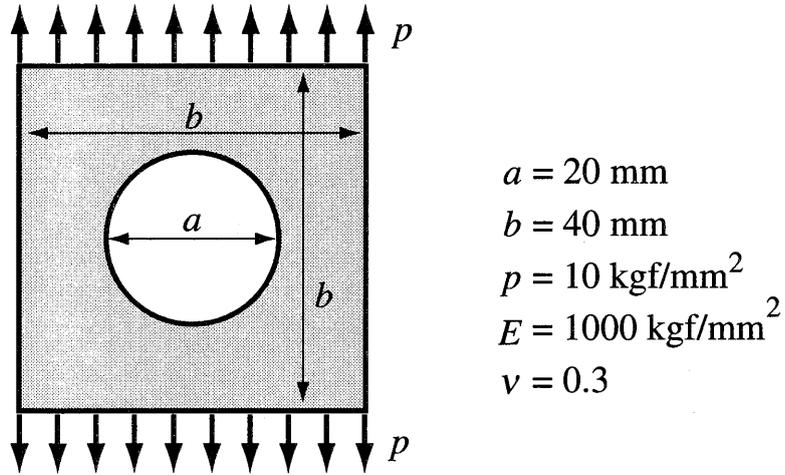


Fig.7 Square plate with a circular hole

Table 1 Plate with a circular hole problem

| step | elem | node | $\ e\ ^{est}$ | $\ u\ ^{est}$ | η^{est} | $\bar{\eta}$ | $\eta^{est}/\bar{\eta}$ |
|------|------|------|---------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------|
| 1 | 94 | 100 | 0.498 | 3.054 | 0.161 | — | — |
| 2 | 238 | 264 | 0.270 | 3.089 | 0.087 | 0.080 | 1.09 |
| 3 | 945 | 964 | 0.138 | 3.094 | 0.045 | 0.044 | 1.02 |
| 4 | 4041 | 4045 | 0.067 | 3.095 | 0.022 | 0.022 | 1.00 |

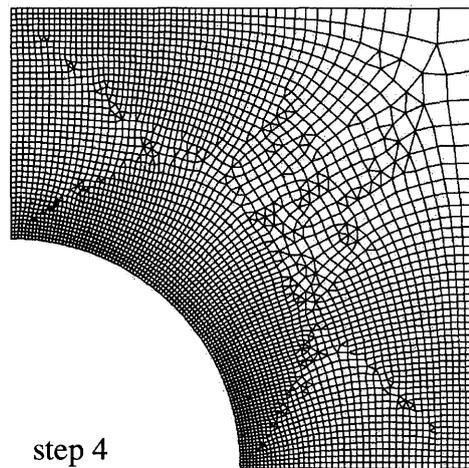
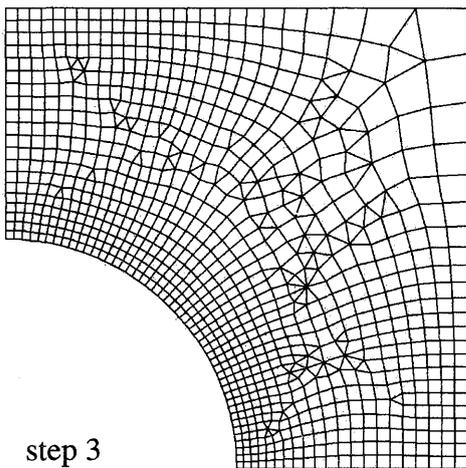
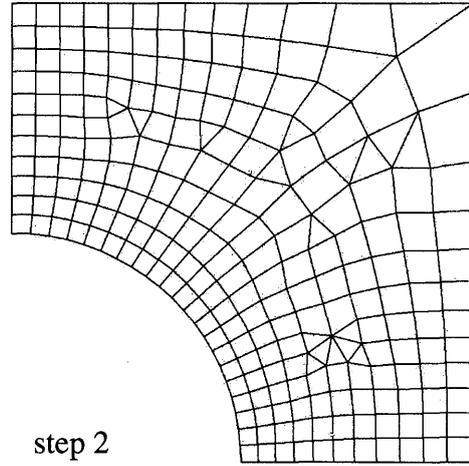
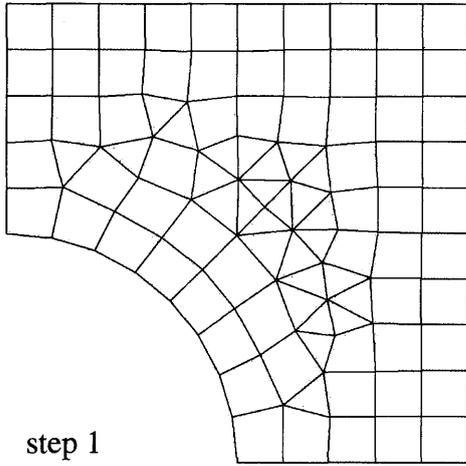


Fig.8 Adaptive remeshes for circular hole plate

4.1.5.2 クラックを有する平板問題

Fig.4.b)のクラック問題に対して、均等再分割による有限要素解析、通常のアダプティブ有限要素解析と特異性を考慮したアダプティブ有限要素解析を適用する。問題の対称性により、1/4モデルを用いた有限要素解析を実行する。Fig.9に示されるような初期分割モデル(step 1)から均等再分割による有限要素解析を行った結果を表2に示す。stepを進めるごとに要素代表長さを半分にするため、要素数は4倍になっている。特異性が存在しない問題に対してこのような分割メッシュを用いた場合には、誤差エネルギーノルムはstepを進める度に半分に減少する。しかし、この問題は強い特異性を有するため、現ステップの誤差エネルギーノルムと前ステップの誤差エネルギーノルムとの比(θ)は0.7強の数値になっている。

次に、アダプティブ有限要素解析を行う。このアダプティブ有限要素解析においても、次ステップの有限要素解析の目標相対誤差 $\bar{\eta}$ として前解析の予測相対誤差 η^{est} の半分程度の数値を与えている。Fig.9に示されるような初期分割モデルから解析を開始したが、式(29)を用いた通常のアダプティブリメッシングによる結果を表3とFig.10に示し、式(32)を用いた特異性を考慮したアダプティブリメッシングによる結果を表4とFig.11に示す。特異性を表すパラメータ β を求めるためには、少なくとも2ステップの有限要素解析が事前に行なわれる必要があるため、特異性を考慮したアダプティブ有限要素解析の最初の2ステップは通常のアダプティブ有限要素解析により求めている。表3に示されるように、通常のアダプティブ有限要素解析では目標相対誤差 $\bar{\eta}$ と予測された相対誤差 η^{est} は一致していない。これに対して、特異性を考慮したアダプティブ有限要素解析の η^{est} と $\bar{\eta}$ にはよい一致が見られる。step 5において $\eta^{est}/\bar{\eta}$ は1.0になり、解析者が要求する精度を実現するアダプティブリメッシュが生成されている。

Table 2 Uniform subdivision for a crack problem

| step | elem | node | $\ e\ ^{est}$ | $\ u\ ^{est}$ | η^{est} | θ |
|------|-------|-------|---------------|---------------|--------------|----------|
| 1 | 25 | 36 | 1.640 | 10.819 | 0.152 | — |
| 2 | 100 | 121 | 1.227 | 11.139 | 0.110 | 0.748 |
| 3 | 400 | 441 | 0.896 | 11.293 | 0.079 | 0.730 |
| 4 | 1600 | 1681 | 0.641 | 11.370 | 0.056 | 0.715 |
| 5 | 6400 | 6561 | 0.456 | 11.408 | 0.040 | 0.711 |
| 6 | 25600 | 25921 | 0.323 | 11.427 | 0.028 | 0.708 |

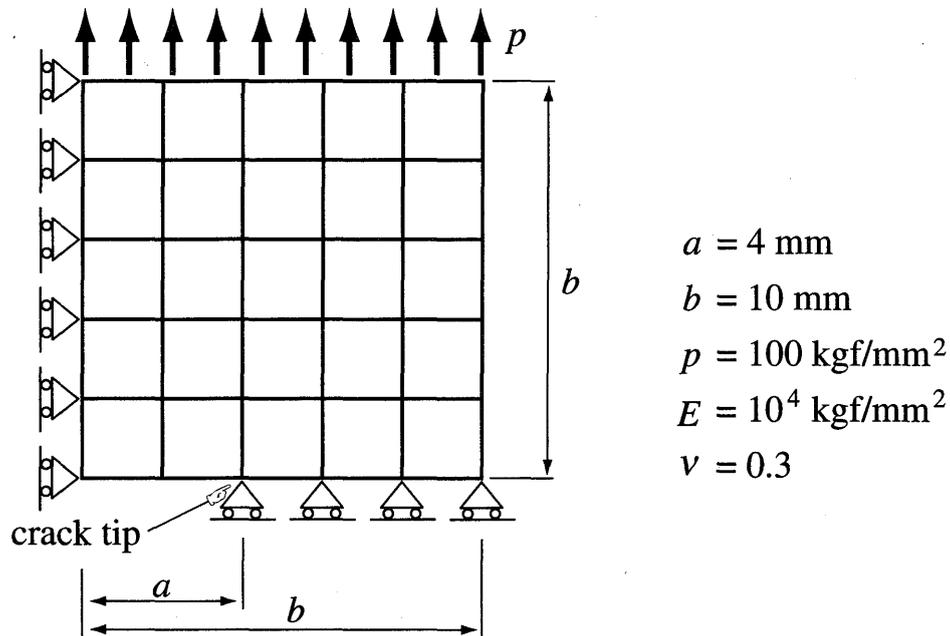


Fig.9 Square plate with a crack

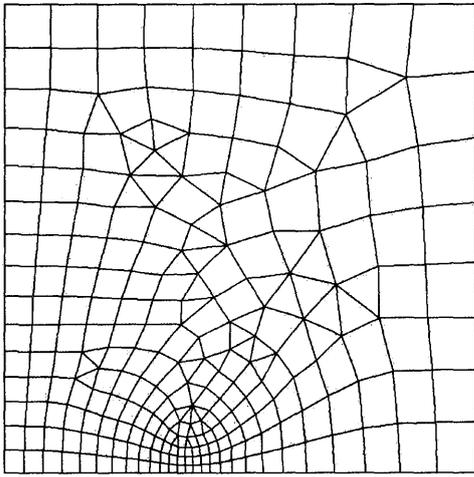
Table 3 Normal adaptive remeshing for a crack problem

| step | elem | node | $\ e\ ^{est}$ | $\ u\ ^{est}$ | η^{est} | $\bar{\eta}$ | $\eta^{est}/\bar{\eta}$ |
|------|------|------|---------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------|
| 1 | 25 | 36 | 1.640 | 10.819 | 0.152 | — | — |
| 2 | 60 | 63 | 1.505 | 11.232 | 0.134 | 0.08 | 1.66 |
| 3 | 110 | 117 | 1.036 | 11.282 | 0.092 | 0.07 | 1.31 |
| 4 | 254 | 260 | 0.748 | 11.377 | 0.066 | 0.05 | 1.32 |
| 5 | 644 | 634 | 0.492 | 11.422 | 0.043 | 0.035 | 1.23 |

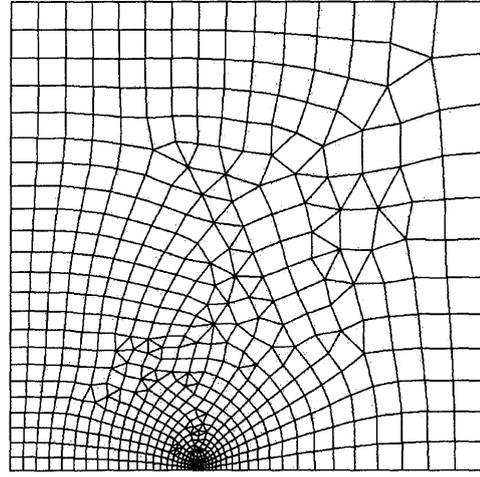
Fig.12 に均等分割を用いた有限要素解析と特異性を考慮したアダプティブ有限要素解析における節点数と誤差エネルギーノルム関係（誤差収束率）を示す。図中の収束率に従うと、アダプティブ有限要素解析は40,000節点を用いた均等分割メッシュと同程度の精度を2,000節点により得ることが可能である。このように、本研究で提案する特異性を考慮したアダプティブ有限要素解析は少ない節点数や要素数を用いても非常に高い精度を実現する解析手法である。

Table 4 Present adaptive remeshing for a crack problem

| step | elem | node | $\ e\ ^{est}$ | $\ u\ ^{est}$ | η^{est} | $\bar{\eta}$ | $\eta^{est}/\bar{\eta}$ |
|------|------|------|---------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------|
| 1 | 25 | 36 | 1.640 | 10.819 | 0.152 | — | — |
| 2 | 60 | 63 | 1.505 | 11.232 | 0.134 | 0.08 | 1.66 |
| 3 | 113 | 123 | 1.018 | 11.294 | 0.091 | 0.07 | 1.36 |
| 4 | 334 | 331 | 0.670 | 11.397 | 0.059 | 0.05 | 1.18 |
| 5 | 1419 | 1347 | 0.348 | 11.438 | 0.030 | 0.03 | 1.00 |

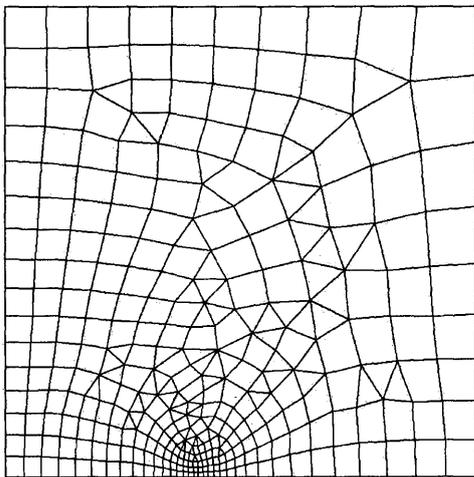


step 4

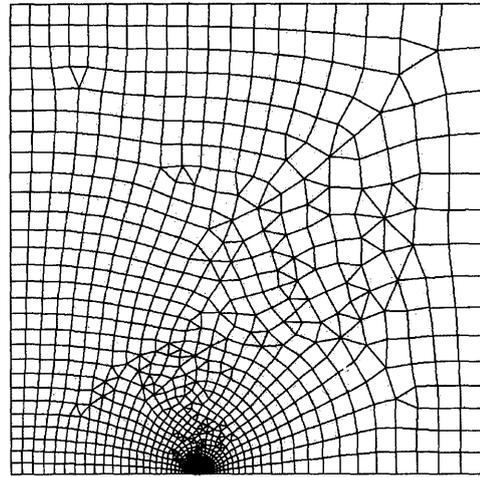


step 5

Fig.10 Adaptive remeshes for a crack problem without considering singularity



step 4



step 5

Fig.11 Adaptive remeshes for a crack problem with considering singularity

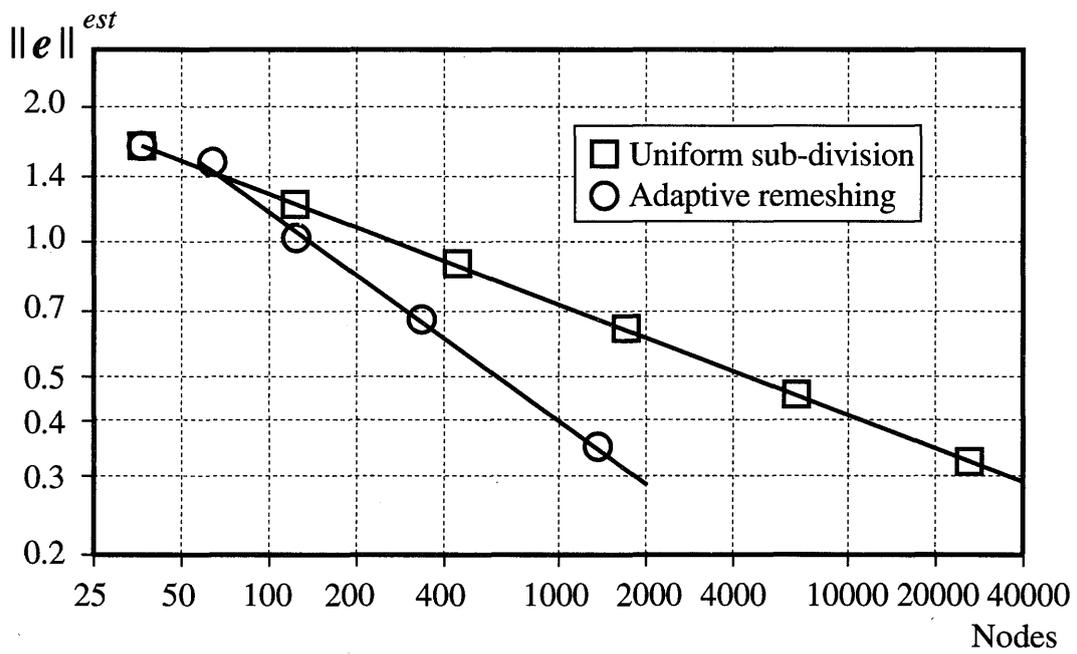


Fig.12 Convergence of error energy norm of uniform sub-division and adaptive remeshing

4.1.6 結言

き裂を含む2次元弾性問題を対象としたアダプティブ有限要素解析の実現のためには要素代表長さの決定が重要になる。事後誤差評価の結果を利用することにより、解析者が要求する精度を満足するための要素代表長さを得ることができる。特異性の強さと誤差エネルギーノルムの関係を表現するためのパラメータを導入し、この数値をアダプティブ有限要素解析中に推定する方法を提案した。これにより、き裂問題のように特異性が存在する弾性解析においても要求された精度を満足するアダプティブリメッシングを得ることが可能になった。

参考文献

- (1) Zienkiewicz O.C. and Zhu J.Z, I. J. Num. Meth. Eng., 24, (1987), 337-357.
- (2) 大坪・北村, I. J. Num. Meth. Eng., 29, (1990), 233-244.
- (3) 大坪・北村, 機論, 56-525, A (1990), 1240-1247.
- (4) 大坪, 応用数理, 2.3, (1992), 39-53.
- (5) 北村・ほか3名, 西部造船会, 87, (1994), 263-273.
- (6) 北村・ほか2名, 西部造船会, 92, (1996), 191-199.
- (7) 川村・ほか2名, 日本造船学会, 175, (1993), 291-298.

4.2 座屈に関する解析

4.2.1 座屈損傷に関する解析の概要

座屈とは面内荷重に対して面外変形が生じる現象である。その現象には弾性的なものや弾塑性的なものがあり、挙動が弾性範囲内におさまるならば、座屈による損傷は発生しない。よって、損傷を考える際には塑性も考慮した座屈理論を考える必要がある。

海洋構造物および船体構造は、まず種類が多様であること、構造も多様であることなどから、局部強度として座屈を考えるのは非常に複雑な考察を要する。まず、解析対象としては、柱、矩形板、防撓板、シェル等が考えられる。また、形状が複雑であったり穴のある構造などがあり、簡単な解析解で問題を解明できない場合が多い。

ここでは、主に解析的に解明可能な座屈理論について説明する [1]。

4.2.2 梁柱の座屈

オイラーの座屈理論により、両端支持の柱の座屈応力 σ_E は式(1)により表される。

$$\sigma_E = \frac{P_E}{A} = \pi^2 E \left(\frac{k}{L}\right)^2 \quad (1)$$

ここで、 L は柱の長さ、 E はヤング率、 $k(= \sqrt{I/A})$ は環動半径、 A は断面積、 I は断面2次モーメントである。

細長い柱の場合には式(1)を適用することができるが、短い柱の場合には座屈応力よりも、降伏応力 σ_Y の方が低くなり、弾塑性座屈を考慮する必要がある。特に重要な点は、 $\sigma_Y = \sigma_E$ 付近における最終強度の評価であり、例えば、ジョンソンの公式により Fig. 1 のように最終強度 σ_C を推定することができる。ジョンソンの式は式(2)である。

$$\sigma_C = \begin{cases} \sigma_E, & \sigma_E \leq \sigma_Y/2 \\ \sigma_Y - \sigma_Y^2/(4\sigma_E), & \sigma_E > \sigma_Y/2 \end{cases} \quad (2)$$

4.2.3 平板の座屈

Fig. 2 のような長方形板に軸力が作用する場合の座屈応力 σ_E は式(3)であらわすことができる。

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 D}{b^2 t} \left[\frac{mb}{a} + \frac{a}{mb} \right]^2 \quad (3)$$

ここで、 a は長方形板の長さ、 b は幅、 t は板厚、 $D(= Et^3/(12(1-\nu^2)))$ は板曲げ剛性である。 m は x 方向の座屈半波数である。また、 ν はポアソン比である。

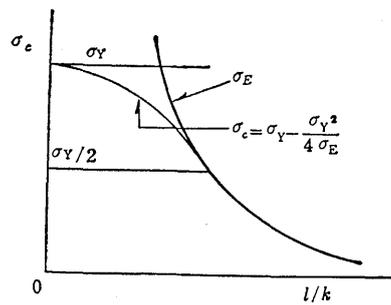


図 1: ジョンソンの公式による σ_c

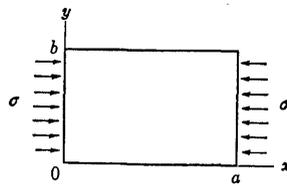


図 2: 圧縮応力 σ をうける長方形板

式 (3) をグラフで表示すると Fig. 3 になる。図から $a/b > 1$ の長方形板においては座屈応力はほとんど一定であることがわかる。よって、 $a/b > 1$ の長方形板においては、弾性座屈応力は式 (4) で表現することができる。

$$\sigma_E = 4 \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (4)$$

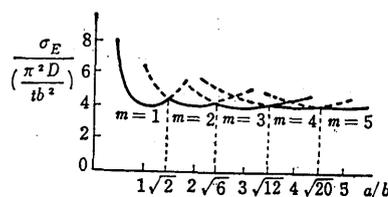


図 3: 周辺単純支持の長方形の弾性座屈応力

Fig. 4 は 2 軸圧縮を受ける矩形板であり、その場合の弾性座屈相関関係は Fig. 5 である。図には縦横比 3 の長方形板の場合の座屈相関関係を示している。このような座屈相関関係は剪断力や面内曲げが複合した場合の座屈相関関係も多数研究結果がある [2]。

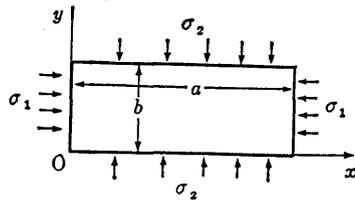


図 4: 2 方向から圧縮される長方形板

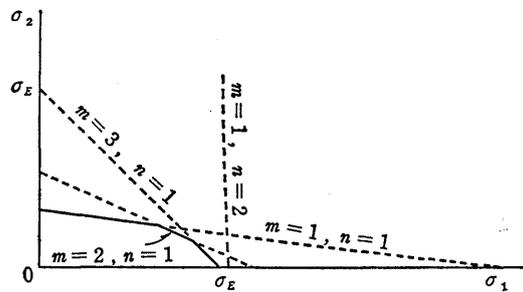


図 5: 2 方向から圧縮される長方形板の弾性座屈相関関係 $a = 3b$

柱の場合、座屈が生じるとそれ以上の荷重をうけもつことができないが、周縁支持の板の場合には座屈後もさらに荷重を受け持つことができる。Fig. 6は座屈後挙動について示した図であり、荷重と撓みの関係と、荷重と軸変位の関係である。座屈後、軸剛性は1/2になっていることがわかる。つまり、座屈後はパネルの幅の1/2しか面内剛性には有効でないことがわかり、この幅を「有効幅」と言う。

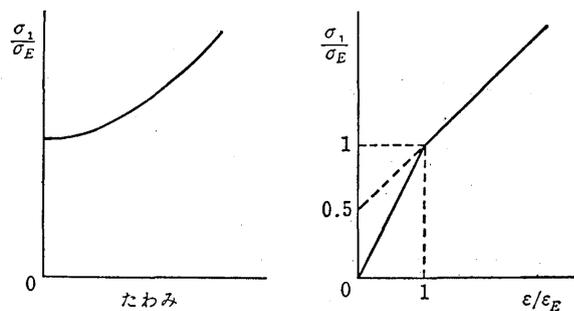


図 6: 周辺単純支持の長方形の座屈後挙動

柱のときと同様に板の場合も厚い板においては座屈応力よりも降伏応力の方が低くなり弾塑性座屈が生じる。船体構造においてもそのように弾塑性座屈が生じ

るような寸法の板が多く使われているので、損傷を考える際には塑性の影響を考慮する必要がある。Fig. 7は正方形板の最終耐力 σ_u である。実線で Faulkner の式である式 (5) を示す。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_Y} = \begin{cases} 2/\beta - 1/\beta^2 & (1 < \beta) \\ 1 & (\beta \leq 1) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $\beta (= b/t\sqrt{\sigma_Y/E})$ は板の厚さを表すパラメータであり細長比と呼ばれる。

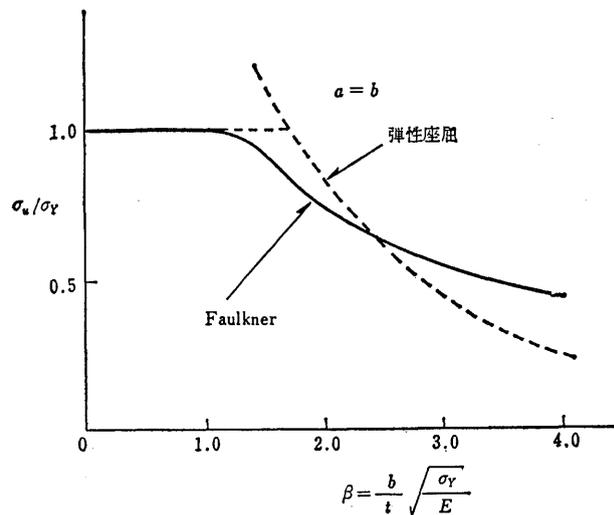


図 7: 正方形板の最終耐力

板の座屈問題には板の材質、形状、境界条件、荷重条件などのパラメータがあり、弾性座屈の現象でさえも解析解による解法には限界がある。ましてや、塑性が伴いながら座屈し、最終強度に達する座屈問題を考える際には、厳密な解析解は不可能で、簡易解析法などの手法が必要になる。また、最近では、これらの現象を有限要素法で解析することも容易になっているので、船体の座屈損傷解析においても有限要素法による解析手法が一般的になると考えられる。

4.2.4 防撓板の座屈

スティフナが入った板の強度についての考察は、船体構造を考える上で非常に重要である。しかし、防撓板の場合、板の解析よりも、さらに考慮すべきパラメータが増えるので、その一般的な性質について議論するのは困難であるが、簡単なモデルにおいて防撓板の座屈の解析解を求める試みもある [3]。

防撓板の座屈を考える際には、座屈解析、座屈後解析、最終強度解析、最終強度後解析などが考えられる。さらに、損傷に関しても、パネルの損傷、スティフ

ナの横倒れなどの損傷、また、防撓板全体の座屈による損傷など、損傷モードも考える必要がある。

有限要素法を使って解析を行えば、弾塑性大撓み解析に至るまで、防撓板の座屈損傷解析は可能であるが、計算機の能力の問題から解析は困難であった。しかし、最近の計算機の能力の向上により、防撓板の最終強度に関する研究もなされている。今後は、船体の座屈損傷に関しても、防撓板レベルでの有限要素法による検証が頻繁になされるものと思われる。

参考文献

- [1] 山本、大坪、角、藤野: 船体構造力学、成山堂。
- [2] Column Research Committee of Japan: Handbook of Structural Stability, Corona Publishing Co., LTD., 1971.
- [3] F. Bleich: Buckling Strength of Metal Structures, McGraw-Hill Book Co., 1952.

複合荷重をうける船体防撓板構造の最終強度解析法

大阪府立大学 工学部

1 緒言

船体構造の安全性を正しく評価するためには、各構造要素の強度を正しく見積もる必要がある。船体は薄板から構成される防撓構造であり、塑性崩壊の際には座屈も伴う。船殻の軽量化に伴い、この座屈を伴う崩壊の現象はますます重要になっている。

船体構造を有限要素法で解析する際に全船を精度よく弾塑性大撓み解析を行うことは現状では困難である。よって、船体構造上問題となる局部強度を解析するのが現実的である。しかし、船体の一部のみを解析する際にはその局部構造の周辺の構造を考慮して、境界条件、荷重条件に十分配慮する必要がある。

船体の局部構造は座屈と塑性が連成して最終強度は一般的に塑性のみを考慮した降伏強度よりも低下する。また、この座屈と塑性の連成により、最終強度後の耐力低下の現象も生じる。船体のハルガーダーとしての最終強度を知るためには、この構造要素の最終強度後の挙動を明確にする必要がある。

船体の局部構造の弾性あるいは最終強度までの挙動を調べる際は、境界条件としては面外の変形に関して自由、単純支持、固定などを考慮するだけで十分であった。しかし、座屈後挙動、最終強度後挙動等を解析する際には、面外変形と面内変形が連成するので境界条件に対して面外の境界条件だけではなく、面内の境界条件も隣接する構造との連続性等を考慮して解析を進める必要がある。

計算機の高速度化及び有限要素法の進歩などから、今後船体の局部強度の崩壊挙動解析が頻繁になされると思われる。そのための基本となる境界条件の設定について慎重に考えておく必要がある。

2 本研究で対象とするモデル

船体の連続防撓板構造において多数のパネルにわたる広い範囲を弾塑性大撓み解析することは計算機の能力の問題から現状では困難である。そこで、防撓構造の変形挙動を明確にした上で、境界条件の設定に注意し、局部強度を解析する。Fig. 1

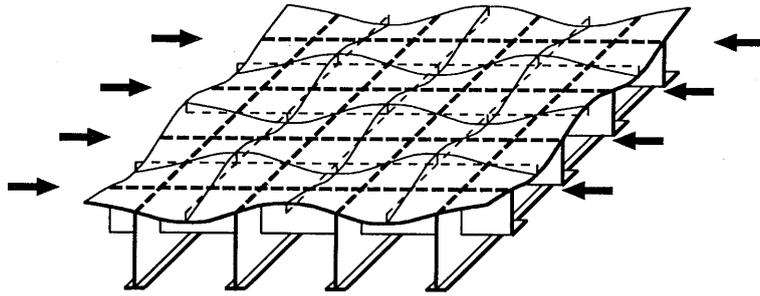


Fig. 1: パネルの局部座屈をおこした防撓構造

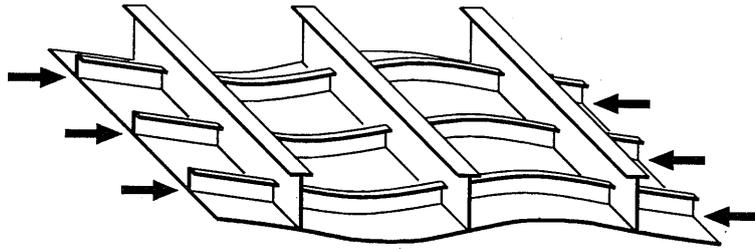


Fig. 2: 全体座屈をおこした防撓構造

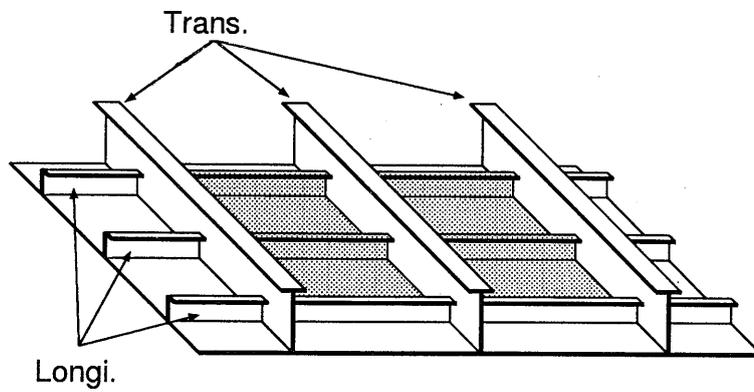


Fig. 3: 対象とするモデル

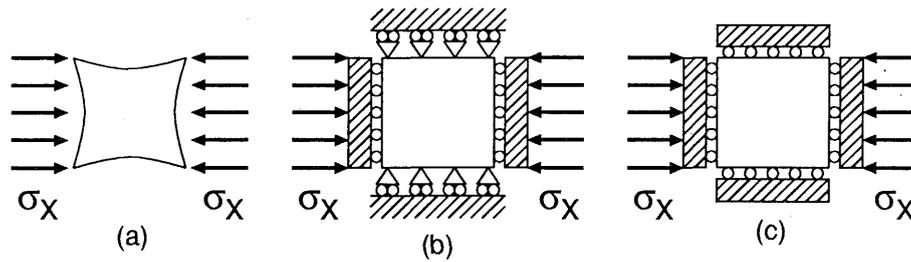


Fig. 4: 圧縮をうけるパネル

は圧縮荷重によりパネルの局部座屈をおこした防撓構造である。パネルは凸状に座屈するものと凹状に座屈するものがあることがわかる。このことから、防撓材とパネルを同時に解く際には縦方向、横方向に少なくとも2パネルは解析する必要があることが解る。

Fig. 2は圧縮荷重により全体座屈をおこした防撓構造である。この場合も、トランス材を支持として、凹状のオイラー座屈をしている部分と凸状のオイラー座屈をしている部分があることが解る。よって、全体座屈も考慮に入れる解析をするためには、少なくとも、縦方向に2パネルは解析する必要がある。

以上の考察から船体防撓構造で考えられる崩壊挙動をある程度正確に調査するためには、Fig. 3で灰色で示すような、4枚のパネルとそれに接続するロンジの領域に対して有限要素解析を行う必要がある。

3 境界の連続性

板の変形挙動を調べる際に線形問題の際は通常境界条件として、固定、単純支持、自由等を考えれば十分である場合が多い。しかし、座屈後挙動のような面内変形と面外変形が連成する場合は、面内剛性に対する境界条件に対して十分な配慮をしないと、船体の局部強度を正しく推定することができない。

3.1 圧縮をうけるパネルの連続性

例えば、Fig. 4に示すような、圧縮うけるパネルの場合、周辺を面内に自由として一様圧縮応力を作用させた場合、パネルの座屈後は座屈撓みによって各辺が中にひきづり込まれる (Fig. 4(a))。このようなモデル化をした場合には、縦横に連続しているパネルの一部を解析したことにならず、実際の連続パネルに対して、過小な強度評価をすることになる。

また、Fig. 4(b)のように、変位制御型の荷重を作用させる場合に y 方向を完全に拘束してしまうと、ポアソン比の影響により2軸圧縮状態になり、座屈荷重さえ正確に推定できなくなる。

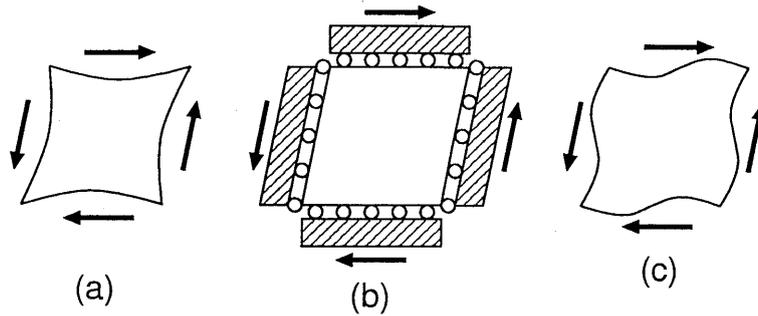


Fig. 5: 剪断をうけるパネル

結論として、縦横に連続しているパネルの一部の解析をする際には Fig. 4(c) のモデルのように、周辺が直線を保つモデルを採用する必要がある。

3.2 剪断をうけるパネルの連続性

Fig. 5に示すような、縦横に連続しているパネルに剪断力が作用している場合の境界条件の設定はさらに困難となる。一様剪断力を加え、面内の拘束を自由にしてある場合 (Fig. 5(a)) は圧縮の時と同様に各辺は座屈撓みと共に中にひきづりこまれ、強度は過小評価となる。一方、Fig. 5(b) のように直線を保つモデルの場合は剪断に対しては拘束条件がきつくなりすぎ、強度を過大に評価してしまう。面内の拘束に関しては上下の変形と左右の変形が同一であれば連続パネルをモデル化したといえる。よって、Fig. 5(c) のようなモデルが適当なモデルと言える。

Fig. 5(a) のモデルの場合は上下と左右の連続の力学的境界条件を満足するが幾何学的境界条件は満足しない。一方、Fig. 5(b) のモデルの場合は上下と左右の連続の幾何学的境界条件を満足するが力学的境界条件を満足しない。Fig. 5(c) のモデルの場合は上下と左右の連続の力学的境界条件と幾何学的境界条件をともに満足する。

3.3 圧縮をうける板つきロンジの連続性

板つきロンジ材の連続性についても同様のことがいえる。例えば、Fig. 6(a)において、断面図心に荷重を作用させて、解析を行っても一般に左断面と右断面は同じ傾きで連続性を満足するように変形はしない。また、パネルの座屈後はパネルは有効幅しか面内剛性を受け持たないので、断面図心はパネル座屈前と比べて変化するが、Fig. 6(a) のモデルではそれを考慮することができない。

Fig. 6(b) のモデルは左右端の回転を拘束して変位制御により解析を進める方法であるが、この場合、拘束がきつくなりすぎる。

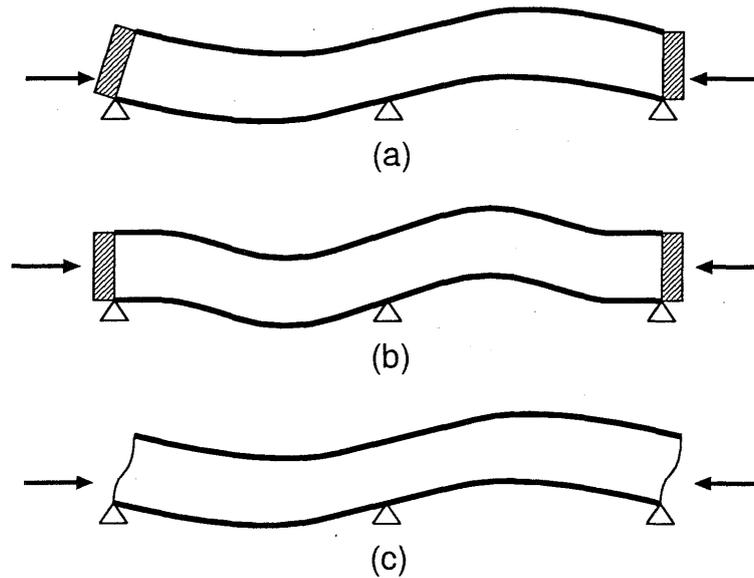


Fig. 6: ロンジの変形

剪断も考慮したティモシェンコ梁理論をこのロンジ材に適用する場合、変形後も断面が平面を保つ仮定は成り立たなくなるし、弾塑性大撓み後は、さらに平面を保つ仮定は意味をなさなくなる。その意味で、Fig. 6(a)やFig. 6(b)のモデルのように左右に剛体を挿入して左の変形状態と右の変形状態は直線を保つという境界条件では拘束がきつくなる。

これらの問題の解決法としてFig. 6(c)のように、左の変形状態と右の変形状態が等しくなるように荷重をかけていくのがよい方法である。

4 解析モデル

以上の、解析対象および境界条件の考察より、解析モデルを提案する。

4.1 境界条件

まず、Fig. 7に拘束する自由度を示した。パネルはトランスの接合部で z 方向の自由度 w を拘束した。また、ロンジはウェブとトランスの接合部で y 方向の自由度 v を拘束した。

次に境界の連続性を考慮するためにいくつかの変形モードを定義する。

はじめに、各外力に対する変形モードをFig. 8に示す。Fig. 8(a)は縦方向の軸力に対する変形モードである。Fig. 8(b)は横方向の軸力に対する変形モードである。Fig. 8(c)は剪断力に対する変形モードである。

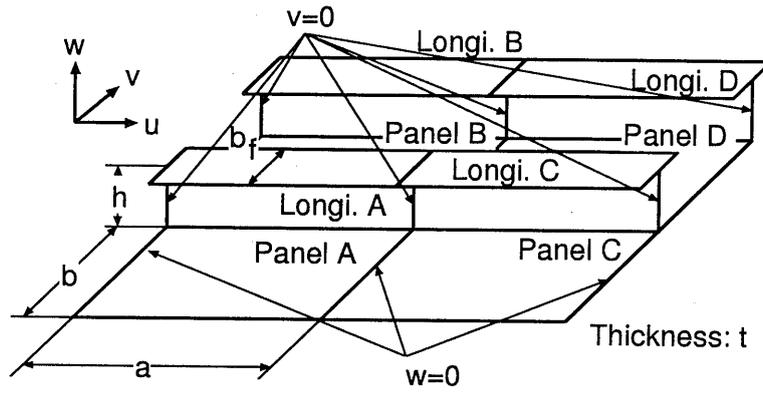


Fig. 7: 解析対象の寸法と自由度の拘束

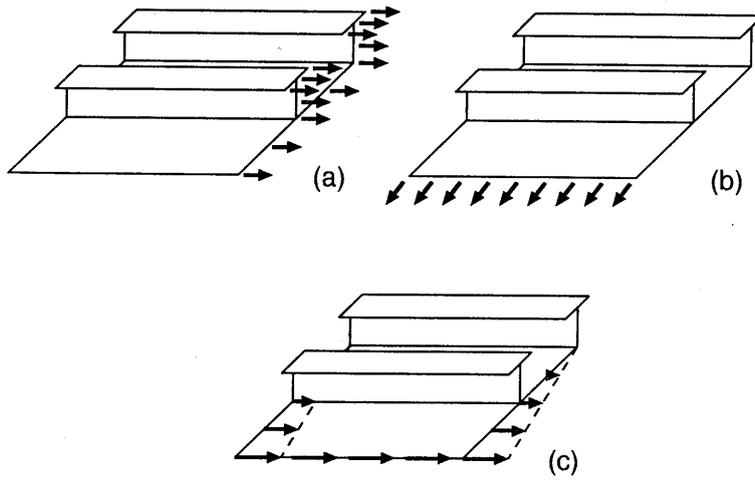


Fig. 8: 各外力に対する変形モード

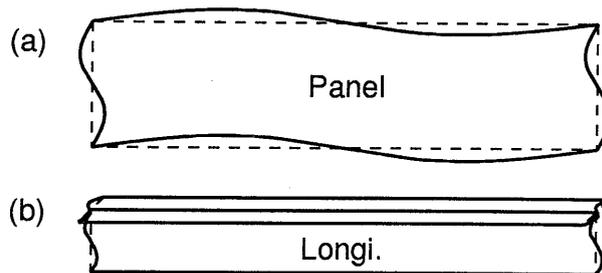


Fig. 9: 境界の連続性を満足させる変形モード

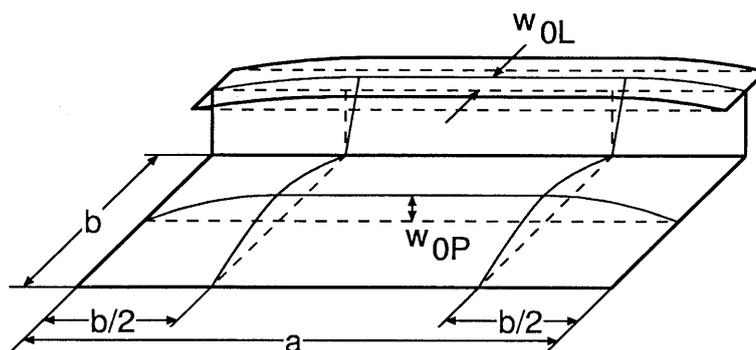


Fig. 11: 初期撓み形状

この変形モードだけでは、拘束がきつくなりすぎるので、境界の左右あるいは上下の変形が同一になるような変形モードを Fig. 9 に示す。Fig. 9(a) はパネルの左右の変形形状が同じになり上下の変形形状も同じになる変形モードである。Fig. 9(b) はロンジ断面の左右の形状が同じになる変形モードである。

多自由度従属拘束の手法 [1], [2] によって、まずこれらの変形モードを定義する。さらに実際の解析においてはこれらの変形モードを重ね合わせて解析を進める。

Fig. 8 と Fig. 9 の変形モードを合成した変形形状を Fig. 10 に示す。Fig. 10(a) はパネルの変形の様子で、Fig. 10(b) はロンジの変形の様子である。

4.2 荷重条件

本研究では、複合荷重をうける船体防撓構造を想定して、2軸圧縮と剪断力が作用する場合について解析を行う。パネルには Fig. 10(a) に示すように2軸圧縮力と剪断力が作用する。また、ロンジには Fig. 10(b) に示すような、縦方向の圧縮力が作用する。各力は、多自由度従属拘束の手法で定義した2軸圧縮と剪断の変形モードに対応する力となっている。

4.3 初期撓み

実際の構造物は溶接による工作により初期撓みや溶接残留応力のような初期不整が存在する。ここでは、初期撓みのみを考慮した。一枚のパネルとロンジに対する初期撓みを Fig. 11 に示す。まず、パネルは左右の部分は縦方向、横方向ともに sin 波形状の初期撓みを有し、中央部は横方向のみに sin 波形状の初期撓みを有すると仮定した。また、ロンジも同様に左右の部分は縦方向に sin 波形状の初期撓みを有すると仮定した。高さ方向には直線状の初期撓みを仮定した。

Table 1: 材料定数

| ヤング率 E [GPa] | ポアソン比 ν | 降伏応力 σ_Y [MPa] | 歪硬化係数 H [MPa] |
|-------------------|----------------|--------------------------|--------------------|
| 200 | 0.3 | 300 | 0.0 |

Table 2: 初期撓み成分

| パネルの初期撓み | | ロンジの初期撓み | |
|----------|----------|----------|----------|
| Panel A | +1.3[mm] | Longi. A | +1.3[mm] |
| Panel B | +1.1[mm] | Longi. B | -1.1[mm] |
| Panel C | +0.7[mm] | Longi. C | -0.7[mm] |
| Panel D | +0.9[mm] | Longi. D | +0.9[mm] |

5 解析結果

Fig. 7に示す領域を有限要素法による弾塑性大撓み解析した。

ヤング率 E , ポアソン比 ν , 降伏応力 σ_Y は Table 1に示す通りである。応力状態は平面応力状態とし, 降伏条件にはミーゼスの条件を使っている。加工硬化は考えていない($H = 0$)。

初期撓みは Fig. 7に示す, Panel A~D, Longi. A~D に対して, 実船計測の結果 [3]をもとに Table 2に示すように与えた。ここで, Fig. 11の形状の方向を正の初期撓みとした。初期撓みを, すべての部材に対して, 同じ大きさにすると, 崩壊は全てのパネルで同時に生じる。しかし, 実際の構造物では初期撓みの大きさはバラツキの大きい統計量である。各構造要素毎にバラツキをもたせた初期撓みを与えた場合, 崩壊の挙動はすべてのパネルで同時に生じるのではなく, ある, 限られた場所で崩壊が生じ, 他の崩壊をしていない場所は, むしろ徐荷して弾性状態にもどる。その意味で Table 2に示すように各部材の初期撓みを微妙に変化させることは重要である。

複合荷重の解析の際には常に各荷重比が同じになるように解析を進めた。

有限要素法解析にあたっては弾塑性大撓みに対応した MITC シェル要素を用いている [4]。非線形解析には Newton-Raphson 法と弧長増分法を使っている。要素分割は Panel A に対して, 24×8 要素分割である。Longi. A のウェブに対しては, 24×4 要素分割であり, フランジに対しても, 24×4 要素分割である。

節点数は 1,617 節点, 要素数は 1,536 要素, 未知自由度は 7,829 元である。1 ケースは約 100step で計算が完了するに設定したが Intel Pentium 200MHz CPU を搭載した IBM 互換パソコンで計算に要する時間は約 15 時間であった。連立方程式の

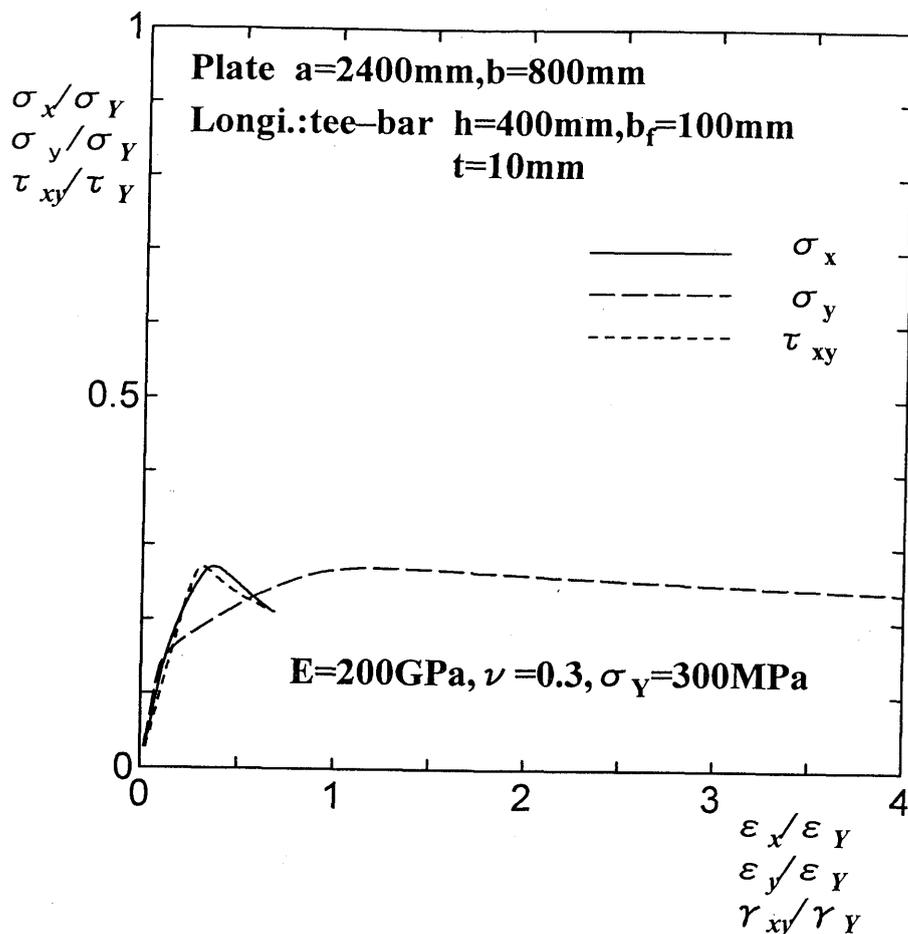


Fig. 12: 2 軸圧縮と剪断が作用する場合の荷重変位曲線

解法には Skyline 法を使ったが、計算に要する部分は連立方程式の求解よりも、応力積分や剛性行列の作成の部分であった。

5.1 2 軸圧縮と剪断が作用する場合

Fig. 12 は 2 軸圧縮と剪断が作用して崩壊したときの荷重変位曲線である。1 パネルの寸法は 2400[mm] × 800[mm] × 10[mm]、ロンジは T 型でその寸法は 400[mm] × 10[mm] + 100[mm] × 10[mm] である。荷重は $\sigma_x/\sigma_Y = \sigma_y/\sigma_Y = \tau_{xy}/\tau_Y$ となるようにかけている。y 方向への崩壊が卓越し、最終強度に達していることが解る。

5.2 圧縮と剪断が作用する場合 (縦横比 3)

Fig. 13 は縦方向の圧縮と剪断が作用して崩壊したときの荷重変位曲線である。荷重比は $\sigma_x/\sigma_Y = \tau_{xy}/\tau_Y$ である。パネル及びロンジの寸法は Fig. 12 の場合と同じである。変形図は最終ステップにおけるものである。剪断の影響により、座屈波

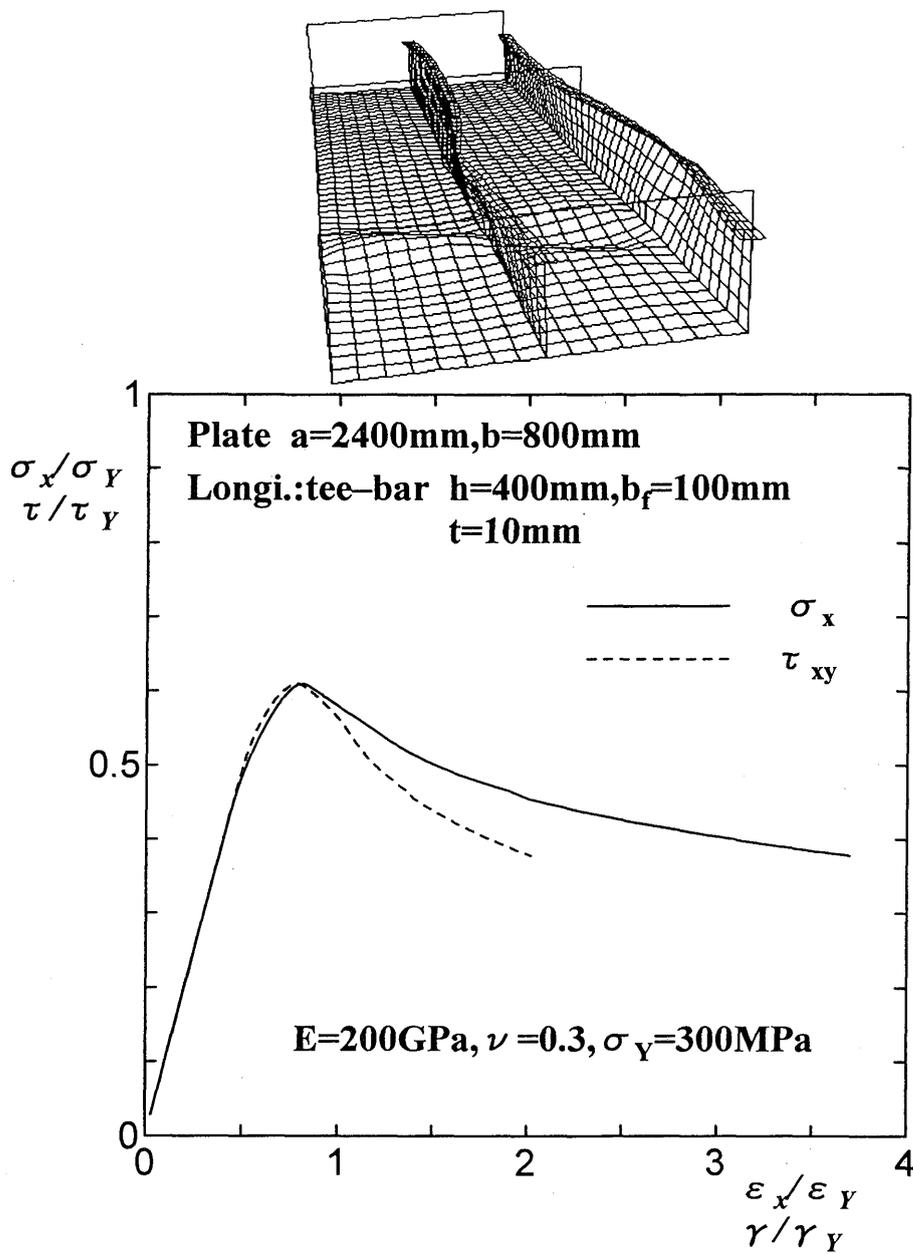


Fig. 13: 圧縮と剪断が作用する場合の荷重変位曲線と最終ステップにおける変形状態, 縦横比3の場合

形が少し斜めになっていることがわかる。また、パネルの局部座屈部とロンジの横倒れ部が同一の場所で起こり、崩壊は局部的であった。

5.3 圧縮と剪断が作用する場合 (縦横比 6)

Fig. 13はパネルの縦横比が3であるが、Fig. 14はパネルの縦横比は6である。荷重比は $\sigma_x/\sigma_Y = \tau_{xy}/\tau_Y$ である。Fig. 14のモデルの場合、防撓板は全体座屈を引き起こしているため、最終強度後は変形が圧縮力によっておこり、剪断変形の増加は抑えられていることがわかる。また、パネルの局部座屈はパネルが圧縮になっている部分で、ロンジの横だおれはロンジフランジが圧縮になっている部分でそれぞれ生じている。なお、この解析対象は、弾性座屈理論ではオイラー座屈形式の全体座屈は生じない寸法であるが、崩壊後はオイラー座屈形式と同様の全体座屈を確認できた。

5.4 圧縮のみ作用する場合と圧縮と剪断が作用する場合の比較

Fig. 15は縦方向の圧縮のみが作用したときと、荷重比 $\sigma_x/\sigma_Y = \tau_{xy}/\tau_Y$ で縦方向の圧縮と剪断が作用したときの比較である。1パネルの寸法は2400[mm]×800[mm]×15[mm]、ロンジはT型でその寸法は400[mm]×15[mm]+100[mm]×15[mm]である。つまり、前のFig. 13モデルに比べて板厚が厚くなっている。縦方向の圧縮のみが作用したときは最終強度は高い位置にあるが、その後すぐに飛び移り現象により、荷重低下を引き起こしている。一方、圧縮と剪断の複合荷重の作用する場合は、最終強度はそれほど高くないが、最終強度後の軸方向の耐力は圧縮のみが作用した場合とそれほど差がないことが解る。

6 結言

以上、防撓板に複合荷重が作用して座屈圧壊した場合の挙動を境界条件の連続性を考慮しながら解析を行い、次の結果を得た。

1. 非線形有限要素法プログラムに多自由度従属拘束の手法を導入することにより、複合荷重をうける連続防撓板の崩壊挙動を合理的に計算することができた。
2. 本解析手法により、防撓板の局部座屈と全体座屈を同時に考慮しながら、崩壊挙動を求めることができた。

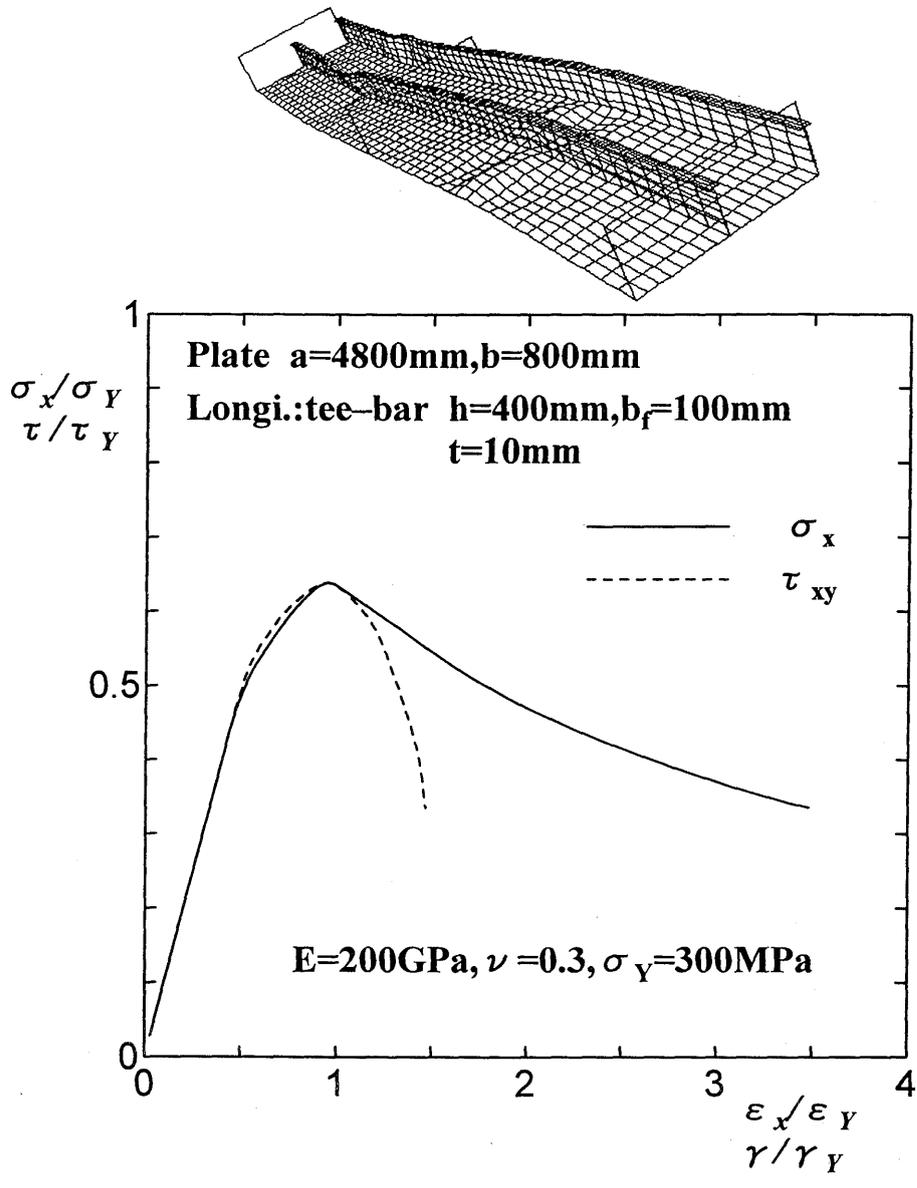


Fig. 14: 圧縮と剪断が作用する場合の荷重変位曲線と最終ステップにおける変形状態, 縦横比6の場合

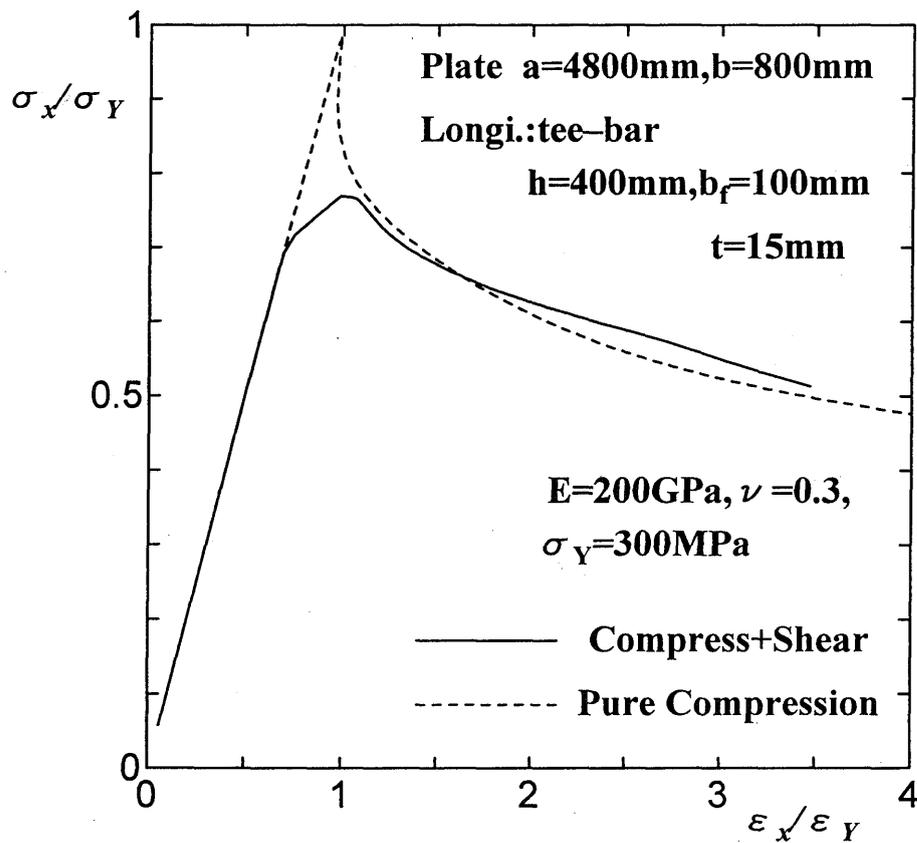


Fig. 15: 圧縮のみ作用する場合と圧縮と剪断が作用する場合の荷重変位曲線の比較

参考文献

- [1] 正岡, 岡田, 上田: 連続性を考慮した矩形パネルの剪断座屈崩壊について, 日本造船学会論文集, 第 181 号, 1997, pp.333-340.
- [2] 正岡, 吉岡, 岡田, 上田: 複合荷重をうける連続矩形パネルの崩壊挙動の解析法, 関西造船協会誌, 第 229 号, 1998, pp.137-143.
- [3] 眞能, 河辺, 正岡, 伊藤: 甲板パネルの圧壊強度に関する統計的性質について, 関西造船協会誌, 第 214 号, 1990, pp.145-156.
- [4] 久田, 野口: 非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善, 1995.

以下の頁は著作権者の許諾を得ていないため、公表できません。

p. 72 ~ p. 81

p. 118 ~ p. 133

p. ~ p.

p. ~ p.

p. ~ p.